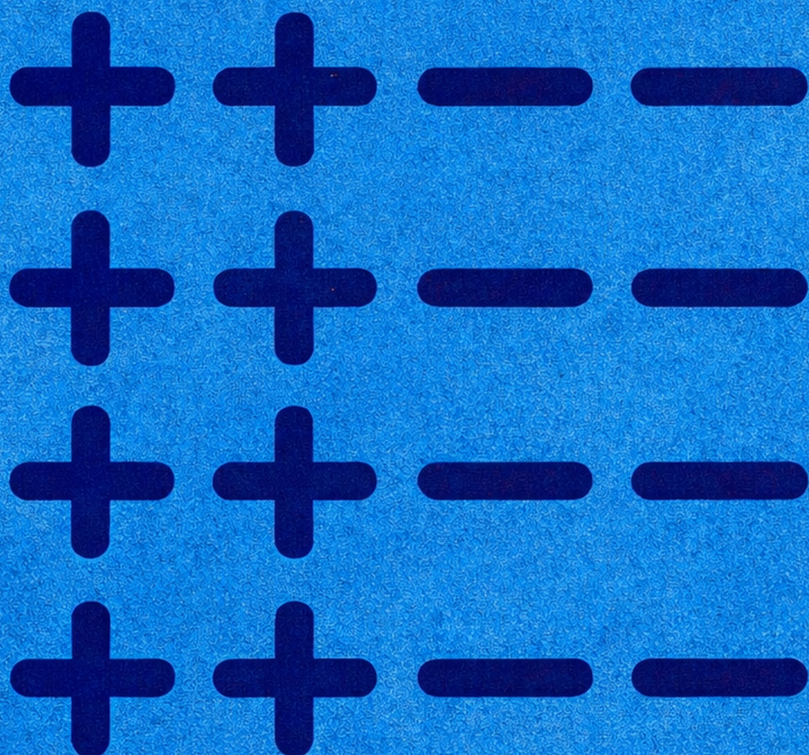


N. NIKULIN

CIENCIA DE LOS
**materiales
eléctricos**



EDITORIAL MIR MOSCÚ

Н. Никулин

Электроматериаловедение

Издательство «Высшая школа» Москва

N. Nikulin

Ciencia de los materiales eléctricos



Editorial Mir
Moscú

Traducido del ruso por el ingeniero Virgilio Llanos Mas

Impreso en la URSS

A NUESTROS LECTORES:

Mir edita libros soviéticos traducidos al español, inglés, francés, árabe y otros idiomas extranjeros. Entre ellos figuran las mejores obras de las distintas ramas de la ciencia y la técnica, manuales para los centros de enseñanza superior y escuelas tecnológicas, literatura sobre ciencias naturales y médicas. También se incluyen monografías, libros de divulgación científica y ciencia-ficción.

Dirijan sus opiniones a la editorial Mir,
1 Rizhski per., 2, 129820, Moscú I-100, GSP, URSS.

На испанском языке

ISBN 5-03-000593-5 © Издательство «Высшая школа», 1984

© traducción al español renovada y ampliada, editorial Mir, 1988

ÍNDICE

Prefacio	1
Capítulo I. Características básicas de los materiales electrotécnicos	8
§ 1. Clasificación y destino de los materiales electrotécnicos	8
§ 2. Características mecánicas de los materiales	8
§ 3. Características eléctricas de los materiales	11
§ 4. Características térmicas de los materiales	17
§ 5. Características físico-químicas de los materiales	20
Capítulo II. Materiales electroaislantes	24
§ 6. Dieléctricos gaseiformes	24
§ 7. Conductibilidad eléctrica de los dieléctricos gaseiformes	26
§ 8. Perforación de los dieléctricos gaseiformes	28
§ 9. Noción general de los dieléctricos líquidos	32
§ 10. Aceites de petróleo	33
§ 11. Dieléctricos sintéticos líquidos	40
§ 12. Conductibilidad eléctrica y perforación de los dieléctricos líquidos	43
§ 13. Materiales sólidos superpolímeros	45
§ 14. Dieléctricos sólidos polimerizados	46
§ 15. Dieléctricos sólidos policondensados	56
§ 16. Dieléctricos superpolímeros resistentes al calor	60
§ 17. Gomas electroaislantes	66
§ 18. Barnices y esmaltes	69
§ 19. Compuestos	76
§ 20. Papeles y cartones	81
§ 21. Telas barnizadas, cintas y tubos barnizados	89
§ 22. Materias plásticas	93
§ 23. Plásticos lamelados	97
§ 24. Materiales micáceos	101
§ 25. Materiales de los desperdicios de mica aglomerados y en capas	109

§ 26. Materiales electrocerámicos	111
§ 27. Vidrios silíceos (inorgánicos)	120
§ 28. Dieléctricos minerales	123
§ 29. Conductibilidad eléctrica y disrupción de los dieléctricos sólidos	125
Capítulo III. Materiales conductores	128
§ 30. Materiales semiconductores de pequeña resisti- vidad	128
§ 31. Materiales conductores de resistividad grande	135
§ 32. Materiales conductores resistentes a altas tem- peraturas (termorresistentes)	137
§ 33. Materiales y artículos metalocerámicos	139
§ 34. Artículos eléctricos de carbón	141
Capítulo IV. Artículos conductores (de cables)	146
§ 35. Hilos de bobinado	146
§ 36. Hilos y cables de montaje	151
§ 37. Conductores de instalación	153
Capítulo V. Materiales semiconductores	156
§ 38. Propiedades fundamentales	156
§ 39. Materiales semiconductores	170
Capítulo VI. Materiales magnéticos	175
§ 40. Características fundamentales	175
§ 41. Clasificación de los materiales magnéticos	180
§ 42. Materiales metálicos magnéticamente blandos	181
§ 43. Materiales metálicos magnéticamente duros	185
§ 44. Ferritas	189
Capítulo VII. Superconductores y crioconductores	193
§ 45. Características fundamentales de los supercon- ductores	193
§ 46. Aplicación de los superconductores	196
§ 47. Propiedades fundamentales de los crioconduc- tores y su aplicación	198
Capítulo VIII. Soldaduras, fundentes y colas	199
§ 48. Soldaduras y fundentes	199
§ 49. Colas y composiciones conglomerantes	204
Literatura	213
Anexos	214

Capítulo I

Características básicas de los materiales electrotécnicos

§ 1. Clasificación y destino de los materiales electrotécnicos

Los materiales electrotécnicos son materiales especiales con los que se fabrican máquinas eléctricas, aparatos, instrumentos y otros elementos de los equipos e instalaciones eléctricas. Generalmente, todos los materiales electrotécnicos se clasifican en cuatro grupos fundamentales: electroaislantes (dieléctricos), conductores, semiconductores y magnéticos.

Es sabido que la fiabilidad de funcionamiento de las máquinas, aparatos e instalaciones eléctricas, depende de la calidad y elección correcta de los correspondientes materiales electrotécnicos.

Mediante la elección racional de los materiales electroaislantes, magnéticos y otros materiales electrotécnicos se pueden crear equipos eléctricos de dimensiones y masa reducidas, seguros en su funcionamiento. Pero para ello se requieren conocimientos de las propiedades de los materiales electrotécnicos y de sus alteraciones bajo el influjo de la tensión eléctrica, temperatura y otros factores. Las magnitudes con ayuda de las cuales se aprecian unas u otras propiedades de los materiales se denominan *características* o *parámetros*. Para apreciar completamente las propiedades de uno u otro material electrotécnico es necesario conocer sus características mecánicas, eléctricas, térmicas y físico-químicas. Para los materiales magnéticos es menester conocer también las características magnéticas, que permiten apreciar sus propiedades magnéticas.

§ 2. Características mecánicas de los materiales

A las características mecánicas fundamentales de los materiales pertenecen: el esfuerzo de ruptura durante la tracción, σ_t ; esfuerzo de ruptura durante la compresión,

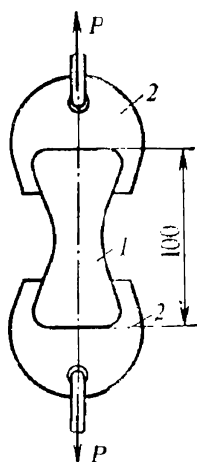


Fig. 1.

Muestra de un material electrocerámico, colocada en los aprietes de una máquina para ensayos a tracción

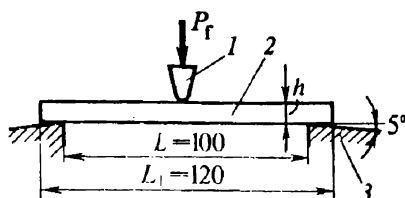


Fig. 2.

Muestra de plástico (barreta) colocada en dos apoyos de acero para la prueba a flexión estática y flexión a choque

σ_c ; esfuerzo de ruptura durante la flexión estática, σ_t y la resiliencia, a .

El esfuerzo de ruptura durante la tracción (σ_t) se determina en las muestras del material cuya forma garantiza la distribución uniforme del esfuerzo tractor por la superficie de la sección en la parte media de la muestra. La muestra 1 se fija por sus extremos engrosados en los aprietes de acero (mordazas) 2 de la máquina de pruebas (fig. 1). El apriete inferior de la máquina es inmóvil, mientras que al otro apriete se aplica un esfuerzo de ruptura (tractor) P , que aumenta paulatinamente a velocidad determinada hasta el momento de rotura de la muestra.

El esfuerzo de ruptura durante la tracción en N/m^2 , se calcula por la fórmula

$$\sigma_t = P/S_0, \quad (1)$$

donde P es el esfuerzo de ruptura al romperse la muestra del material en N^* , y S_0 es el área de la sección transversal de la muestra antes del ensayo en m^2 .

* Newton.

El esfuerzo de ruptura durante la compresión (σ_c) se determina en las muestras que tienen forma de cilindro o cubo. Así, para los plásticos moldeados o prensados esta característica se determina en las muestras que tienen forma de cilindros macizos de 15 mm de altura y de 10 mm de diámetro.

La muestra se coloca entre las placas de acero de la prensa para pruebas, a las que se aplica la carga compresora. Esta última aumenta a velocidad determinada hasta el momento de la rotura de la muestra.

El esfuerzo de ruptura del material durante la compresión en N/m^2 , se calcula por la fórmula

$$\sigma_c = P_c/S_0, \quad (2)$$

donde P_c es el esfuerzo de ruptura durante la compresión de la muestra del material en N, y S_0 es el área de la sección transversal de la muestra del material antes de su ensayo en m^2 .

El esfuerzo de ruptura del material durante la flexión estática (σ_f) se determina en las muestras barretas de sección rectangular. La muestra 2 del material (fig. 2) se coloca en la máquina para pruebas, donde con sus extremos se apoya libremente sobre dos apoyos 3 de acero. El esfuerzo de flexión P_f , que se aplica al centro de la muestra 2 a través de la punta 1 de acero, aumenta paulatinamente hasta la magnitud con la que sucede la rotura de la muestra. El esfuerzo de ruptura del material durante la flexión estática en N/m^2 , se calcula por la fórmula

$$\sigma_f = 1,5 P_f L/bh^2, \quad (3)$$

donde P_f es el esfuerzo flector en N; L , la distancia entre los apoyos de acero de la máquina para pruebas en m; b , la anchura de la muestra en m, y h , el espesor de la muestra en m.

Para la mayoría de los materiales (plásticos) se utilizan barretas de 10×15 mm de sección y de 120 mm de longitud.

La resiliencia a se determina en las muestras que tienen la forma de barretas de 120 mm de longitud y de 15×10 de sección (plásticos) y la de cilindros macizos.

La muestra del material se coloca sobre dos apoyos 3 de acero (véase la fig. 2) del aparato para estas pruebas. Sobre el centro de la muestra a ensayar se asesta un golpe con la punta de acero 1, que cae desde la altura de un péndulo de acero. Con esto tiene lugar una flexión por choque*.

La resiliencia a en J/m^2 se calcula como la relación entre el trabajo ΔA gastado por el péndulo para romper la muestra, y el área S_0 de la sección inicial de ésta

$$a = \Delta A / S_0. \quad (4)$$

Cuanto menor es la magnitud de la resiliencia tanto más frágil es el material dado.

§ 3. Características eléctricas de los materiales *

Resistividad eléctrica. Todo material electrotécnico: conductor, semiconductor e incluso dieléctrico, transmiten la corriente eléctrica. Para apreciar el grado de conductibilidad eléctrica de tal o cual material se requiere determinar la resistividad eléctrica del mismo.

La resistividad eléctrica en $\Omega \cdot \text{m}$ se calcula por la fórmula**

$$\rho = RS/l, \quad (5)$$

donde R es la resistencia total eléctrica de la muestra del material en Ω ; l es la longitud de la trayectoria de la corriente en la muestra del material en m ; S es el área de la muestra del material a través del cual corren las corrientes de conducción en m^2 .

En los conductores metálicos las resistividades son muy pequeñas y se encuentran en los límites de $\rho = 10^{-8} \dots 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$. Esto indica la elevada conductibilidad eléctrica de los materiales conductores.

* Más detalladamente véase: *Vasiliev N. P.* «Trabajos de laboratorio para el estudio de materiales eléctricos.» M. Vysshaya shkola, 1982 (en ruso).

** A veces la resistividad de volumen se expresa en $\Omega \cdot \text{cm}$; $1 \Omega \cdot \text{cm} = 0,01 \Omega \cdot \text{m}$.

En los materiales semiconductores los valores de las resistividades son mayores que las de los conductores, siendo $\rho = 10^{-4} \dots 10^8 \Omega \cdot \text{m}$, y aún mayor en los dieléctricos, donde $\rho = 10^8 \dots 10^{18} \Omega \cdot \text{m}$.

Los valores elevados de la resistividad en los dieléctricos confirman su reducidísima conductibilidad eléctrica. En los dieléctricos se deben tener en cuenta dos resistencias específicas: la resistividad de volumen ρ_v y la de superficie ρ_s . La resistividad de volumen permite valorar la resistencia eléctrica del dieléctrico al circular la corriente a través de su volumen. La resistividad de superficie permite valorar la resistencia eléctrica al circular la corriente por la superficie del dieléctrico. Numéricamente los valores de ρ_s siempre son menores que los valores de ρ_v , y oscilan en los límites de 10^9 a $10^{16} \Omega$.

En los materiales conductores y semiconductores solamente se mide la resistividad total ρ , ya que en estos materiales no se pueden dividir las corrientes de conductibilidad eléctrica de volumen y de superficie y, por consiguiente, no se puede calcular por separado la resistividad de volumen y la de superficie; lo que se explica por la elevada conductibilidad eléctrica de estos materiales.

La resistividad de los materiales electrotécnicos depende en alto grado de la temperatura (fig. 3).

El coeficiente de temperatura de la resistividad, CT_p , es una característica que permite apreciar el cambio de la resistividad eléctrica del material al variar su temperatura. Durante la variación lineal de la resistividad (en un intervalo limitado de temperaturas) la magnitud CT_p en 1°C , se calcula por la fórmula

$$CT_p (\alpha) = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_1 (t_2 - t_1), \quad (6)$$

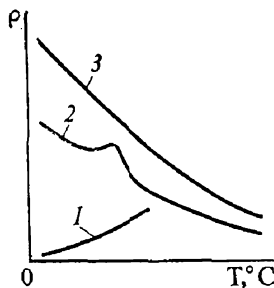


Fig. 3.
Dependencia entre la resistividad de los materiales y la temperatura:
1, conductores; 2, semiconductores; 3, dieléctricos

donde ρ_1 es la resistividad eléctrica del material a la temperatura inicial t_1 ; ρ_2 es la resistividad eléctrica del material a la temperatura t_2 .

En la fig. 3 se puede ver que para los conductores $CT_p > 0$. Esto señala el crecimiento de la resistencia eléctrica al aumentar la temperatura de los conductores. En los semiconductores y dieléctricos $CT_p < 0$, lo que señala la disminución de la resistencia al elevarse la temperatura de estos materiales.

Permitividad ϵ . La permitividad ϵ deja determinar la aptitud del dieléctrico a formar una capacidad eléctrica. Es conocido que la capacidad C de un condensador plano de dos armaduras metálicas es directamente proporcional a la magnitud de la permitividad ϵ

$$C = \epsilon_0 \epsilon S/h, \quad (7)$$

donde h es el grosor del dieléctrico, m; S es la superficie de una armadura metálica, m^2 ; ϵ_0 es la constante dieléctrica ($\epsilon_0 = 8,85416 \cdot 10^{12}$ F/m); ϵ es la permitividad (magnitud adimensional).

La permitividad de los materiales dieléctricos depende de la intensidad de los procesos de polarización, que transcurren en los dieléctricos bajo la acción de la tensión aplicada. Se distinguen cuatro tipos fundamentales de polarización de los dieléctricos: electrónica, dipolar, iónica y espontánea.

La polarización electrónica es el desplazamiento elástico de las capas electrónicas respecto al núcleo en los átomos del dieléctrico. La polarización electrónica transcurre sin excepción en todos los dieléctricos.

La polarización dipolar representa el giro de las moléculas polares (dipolos). Este tipo de polarización solamente se observa en los dieléctricos polares, compuestos de moléculas polares, cargadas eléctricamente. Los dieléctricos que se componen de moléculas eléctricamente neutras se denominan dieléctricos neutros.

Puesto que en los dieléctricos neutros transcurre solamente un tipo de polarización, la electrónica, su permitividad no es grande, $\epsilon = 1 \dots 2,2$. En los dieléctricos polares la intensidad de polarización es mayor que en los neutros, ya que en estos dieléctricos tienen lugar

dos tipos de polarización: la dipolar y la electrónica. Por esto, la permitividad de los dieléctricos polares es mayor que la de los neutros, y se encuentra en los límites de 3 a 8 y más.

En los dieléctricos iónicos cristalinos (mica, electrocerámica), a la par de la polarización electrónica, tiene lugar la **polarización iónica**, que representa el desplazamiento elástico de los iones desde sus lugares de afianzamiento. Por consiguiente, la intensidad del proceso de polarización en los dieléctricos iónicos es suficientemente grande, por lo que la permitividad en ellos es de 8 a 20 y más.

La **polarización espontánea** transcurre en un tipo especial de dieléctricos, denominados ferroeléctricos. Un representante típico de este grupo de dieléctricos es la sal de Seignette $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.

En el interior de los ferroeléctricos existen zonas (dominios) con dipolos de débil enlace. Al aplicar una tensión en el ferroeléctrico comienza a desarrollarse intensamente el proceso de polarización espontánea. Éste es el giro de los dipolos bajo la acción de las fuerzas del campo eléctrico en el interior del ferroeléctrico. Al mismo tiempo en el ferroeléctrico transcurren los procesos de polarizaciones iónica y electrónica. Por esto la permitividad de los ferroeléctricos alcanza valores de 1500 a 4500 y más.

La permitividad de los materiales dieléctricos varía en dependencia de la temperatura (fig. 4), frecuencia de la tensión aplicada y otros factores.

Tangente del ángulo de pérdidas dieléctricas ($\text{tg } \delta$). Si aplicamos una vez a un trozo de conductor metálico una tensión constante y otra vez una tensión alterna, cuyo valor eficaz sea igual al de la tensión constante, las pérdidas de energía en uno y otro caso serán iguales, es decir, $P_{\sim} = P_{-}$.

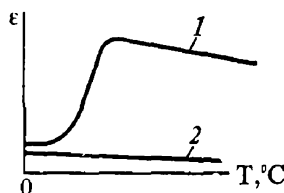


Fig. 4.
Dependencia entre la permitividad y la temperatura:
1, dieléctrico polar; 2, dieléctrico neutro

Si repetimos este mismo experimento con un dieléctrico las pérdidas de energía en él cuando la tensión es alterna serán muchas veces mayores que las pérdidas de energía con la tensión continua, es decir, $P_{\sim} \gg P_{-}$. Las pérdidas de energía en el dieléctrico se denominan *pérdidas dieléctricas* (potencia activa).

La potencia activa, W , que se pierde en el dieléctrico que trabaja bajo la tensión constante U se calcula por la fórmula

$$P = UI,$$

donde I es la corriente de conducción a través del dieléctrico, A ; U es la tensión aplicada al dieléctrico, V .

La potencia activa, W , que se pierde en el dieléctrico que trabaja bajo tensión alterna se calcula por la fórmula

$$P_a = U^2 2\pi f C \operatorname{tg} \delta, \quad (8)$$

donde U es la tensión alterna aplicada al dieléctrico, V ; f , es la frecuencia, Hz ; C es la capacidad del dieléctrico (aislamiento), F .

De la expresión (8) se deduce que para la tensión dada U , frecuencia f y capacidad C del dieléctrico las pérdidas activas en éste dependerán de la magnitud $\operatorname{tg} \delta$. Para los dieléctricos gaseosos $\operatorname{tg} \delta = 10^{-6} \dots 10^{-5}$, por lo que los dieléctricos gaseosos (el aire y otros) se utilizan en los condensadores modelos.

Los dieléctricos líquidos y sólidos de clase superior tienen $\operatorname{tg} \delta = (2 \dots 6) \cdot 10^{-4}$, y los restantes $\operatorname{tg} \delta = 0,002 \dots 0,05$.

Así pues, $\operatorname{tg} \delta$ determina las pérdidas de energía en los dieléctricos. Esta magnitud depende en alto grado de la temperatura del dieléctrico (fig. 5).

El aumento de $\operatorname{tg} \delta$ del dieléctrico neutro y, por consiguiente, de las pérdidas de energía en él, está determinado por el incremento de la corriente de conducción en el dieléctrico. En el dieléctrico polar el crecimiento de $\operatorname{tg} \delta$ hasta la temperatura t_1 queda determinado por las pérdidas de energía que se gasta en el giro de cada vez mayor cantidad de moléculas polares. En el intervalo de temperaturas $t_1 - t_2$ las pérdidas de energía disminuyen. Ello está provocado por el hecho de que el calen-

tamiento grande del dieléctrico priva al dipolo de la posibilidad de participar en el proceso de polarización, pues tiene lugar la dispersión térmica de los dipolos. El incremento de $\operatorname{tg} \delta$ y, por lo tanto, de las pérdidas activas en el dieléctrico, comenzando desde la temperatura t_2 y más, está condicionado por el aumento de la corriente de conducción, ya que al calentar el dieléctrico por encima de la temperatura t_2 disminuye la viscosidad

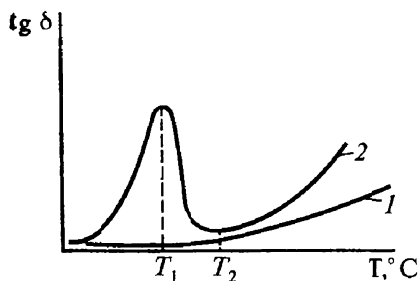


Fig. 5. Dependencia entre la tangente del ángulo de pérdidas dieléctricas y la temperatura del dieléctrico: 1, dieléctrico polar; 2, dieléctrico neutro

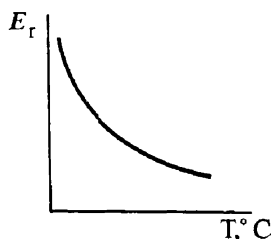


Fig. 6. Dependencia entre la rigidez eléctrica y la temperatura del dieléctrico (durante la ruptura por calor)

de éste y los transportadores de corriente (los iones y electrones libres) adquieren mayor velocidad, debido a lo cual aumenta la corriente de conducción.

La rigidez eléctrica E_r es la intensidad del campo magnético con la que tiene lugar la perforación, es decir, la ruptura del dieléctrico con la formación de un canal pasante de gran conductancia. La rigidez eléctrica de un dieléctrico, V/m, al perforarlo en un campo uniforme*, se calcula por la fórmula

$$E_r = U_p/h, \quad (9)$$

donde U_p es la tensión de perforación con la que comienza la ruptura del dieléctrico, V; h es el espesor del dieléctrico en el lugar de la perforación, m.

* Se denomina uniforme el campo eléctrico en el que en todos los puntos son iguales las intensidades E .

Puesto que los dieléctricos se perforan a tensiones muy grandes (miles de voltios) los valores de la rigidez eléctrica se calculan en megavoltios por metro del espesor del material en el lugar de perforación (MV/m).

Como regla, E_r disminuye al aumentar el grosor del dieléctrico y al elevar la temperatura (fig. 6).

§ 4. Características térmicas de los materiales

Las características térmicas permiten apreciar la conducta de los materiales dieléctricos durante su calentamiento. Esto tiene gran importancia, puesto que la mayoría de los materiales dieléctricos en las máquinas y aparatos eléctricos trabaja a temperaturas elevadas. Las características térmicas principales son las siguientes.

El punto de fusión se determina en los materiales de estructura cristalina (metales, semiconductores, dieléctricos) que pueden pasar de estado sólido a líquido a una temperatura determinada.

La temperatura de reblandecimiento se determina en los materiales de estructura amorfa (resinas, betunes, y otros). En estos materiales la transición del estado sólido al líquido transcurre no a una temperatura estrictamente determinada, sino en cierto intervalo de temperaturas. Por esto, en los materiales amorfos, se mide cierta temperatura convencional de reblandecimiento, a la que el material adquiere un estado viscofluido. A temperaturas próximas a la temperatura de reblandecimiento el material no debe emplearse, ya que se ablandará y chorreará.

La estabilidad térmica es la característica que permite apreciar la resistencia de los dieléctricos al calentamiento efímero. La estabilidad térmica se determina con ayuda del aparato de Martens (fig. 7), en muestras que representan barretas con sección de 10×15 mm y de 120 mm longitud. Las barretas 7 se colocan en el aparato en posición vertical en los alojamientos 9, soldados a la placa de acero 10. La placa se coloca en el fondo del aparato 8, que se calienta por las espirales de alambre de calentamiento eléctrico. En el extremo superior de cada

barreta se coloca el apriete de acero 6, equipado con el vástago 5 portador de la carga 11. En el extremo libre del vástago se apoya la barra fina de acero 1 con el indicador 2. La carga 11 se instala en el vástago 5 de tal manera que en la sección peligrosa de la barreta, bajo

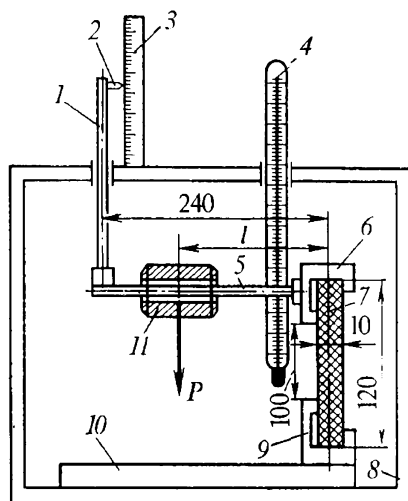


Fig. 7.
Aparato de Martens para la determinación de la estabilidad térmica de los plásticos

la acción del momento flector, se origine una tensión de $50 \times 10^5 \text{ N/m}^2$.

En el aparato de Martens, simultáneamente, se colocan tres muestras del material dado, entre las que se interponen dos termómetros 4. La elevación de la temperatura dentro del termostato se efectúa con ayuda del termorregulador a una velocidad de 50°C por hora. Cuando sobre las muestras actúan a la vez el calentamiento y el momento flector, éstas comienzan a deformarse: se doblan. Con esto el extremo libre del vástago 5 y la barra 1 descienden. La profundidad de descenso del vástago se fija con el indicador 2 en la escala milimétrica 3.

Se admite por estabilidad térmica, determinada por

este método, la temperatura con la que la deformación de la muestra alcanza tal límite en el que el indicador ² desciende por la escala en 6 mm. Al hacer esto, sobre la base del ensayo simultáneo de tres muestras del material dado, se calcula la magnitud media aritmética de la temperatura, es decir, por las indicaciones de los dos termómetros. Así, por ejemplo, la estabilidad térmica (según Martens) para el poliestireno es de 75 a 80 °C, para el guetinax (cartón baquelizado) es de 150 a 170 °C.

La resistencia al calor es la capacidad de un material electroaislante de tolerar prolongadamente una temperatura admisible límite sin indicios de destrucción. Para los materiales electroaislantes que se utilizan en las máquinas y aparatos eléctricos se han establecido siete clases de resistencia al calor (tabla 1).

Tabla 1. *Clase de resistencia al calor de los materiales electroaislantes*

Clase de resistencia al calor	Temperatura admisible límite, °C
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
C	Más de 180

A la clase Y pertenecen los dieléctricos orgánicos: poliestireno, polietileno; los materiales fibrosos no impregnados: cartones, papeles, tejidos de algodón, seda natural y otros.

A la clase A pertenecen los tejidos de algodón y seda impregnados con barnices u otras composiciones (telas barnizadas), y también muchos plásticos, como el cartón baquelizado, la textolita y otros.

A la clase B pertenecen tales materiales como las películas electroaislantes de lavsán (fibra sintética), el laminado de tela de fibra de vidrio impregnado con resina de baquelita y otros.

A la clase E pertenecen todos los materiales micáceos conglomerados (micanitas) y los materiales cuya base es la fibra de vidrio, en los que se emplean compuestos aglutinantes de la clase de resistencia al calor A o E (resinas de baquelita, lacas a base de éstas u otras resinas).

A la clase F pertenecen los materiales sobre la base de la mica, asbesto o fibra de vidrio, aglutinados o impregnados con lacas de elevada resistencia al calor (epóxidas y otras).

A la clase H pertenecen las lacas siliconas, y asimismo los materiales de composición constituidos por mica, fibras de vidrio, conglomerados con ayuda de resinas y lacas siliconas.

A la clase C pertenecen principalmente los dieléctricos de origen inorgánico (electrocerámica, vidrio, mica sin compuestos aglutinantes o impregnantes de origen orgánico y otros). De los dieléctricos orgánicos polímeros de alto peso molecular, el plástico fluorocarbúrico-4 y los polímeros imidógenos entran en esta clase.

La resistencia al frío permite apreciar la capacidad del material a oponerse a la acción de temperaturas bajas. Es conocido que, a temperaturas bajas, los materiales electroaislantes (gomas, plásticos, películas de laca y otros) se agrietan o pierden su elasticidad.

Para los dieléctricos líquidos la resistencia al frío se determina por la temperatura de solidificación, a la que éstos se convierten en cuerpo sólido.

La temperatura de inflamación de los vapores de los dieléctricos líquidos (aceites) es aquella a la que los vapores y gases que se originaron durante el calentamiento de un volumen determinado de dieléctrico líquido, se inflaman al contactar con la llama desnuda.

§ 5. Características físico-químicas de los materiales

El índice de acidez es la cantidad de miligramos (mg) de potasa cáustica (hidróxido potásico KOH) necesaria para neutralizar los ácidos libres contenidos en 1 g de dieléctrico líquido.

Cuanto mayor es el índice de acidez tanto más grande es la cantidad de ácidos libres en el dieléctrico líquido, y esto quiere decir que la conductibilidad de éste será mayor, pues los ácidos, bajo la acción de la tensión eléctrica, se desintegran fácilmente en iones. Además, los ácidos pueden destruir los materiales fibrosos electroaislantes (papel, envoltimiento de tejido de algodón y otros), con los que contacta el dieléctrico líquido.

La **viscosidad** es el coeficiente de rozamiento interno durante el desplazamiento relativo de las partículas del líquido. Si la viscosidad es muy grande el líquido es espeso y sus partículas tienen poca movilidad, pero si la viscosidad es pequeña las partículas del líquido son móviles, es decir, el líquido tiene buena fluidez.

La viscosidad determina la capacidad impregnante de los dieléctricos líquidos. Cuanto menor es la viscosidad de los compuestos electroaislantes para impregnación (lacas, compuestos) tanto mayor es la profundidad a la que penetran sus partículas en los poros del aislamiento fibroso de los envoltimientos. Con el incremento de la viscosidad disminuye la capacidad de impregnación de los dieléctricos líquidos. Para la apreciación del coeficiente de rozamiento interno del líquido se determinan las viscosidades cinemática (m^2/s) y convencional (s).

Con el aumento de la temperatura disminuye la viscosidad en todos los líquidos. Ello se explica por el decremento de las fuerzas de interacción entre las partículas del líquido.

La **higroscopicidad** es la característica que permite apreciar la aptitud del dieléctrico a oponerse a la influencia del agua, que al penetrar en los poros del material provoca el empeoramiento de sus características eléctricas. Para la apreciación de la higroscopicidad las muestras de dieléctricos sólidos primero se pesan, y después se sumergen en un recipiente con agua a temperatura ambiente. Transcurridas 24 h* las muestras se sacan del agua y se pesan de nuevo.

* Para los materiales que tienen poca higroscopicidad esta magnitud se determina después de encontrarse las muestras en el agua durante 48 y 72 h.

La higroscopicidad W del material, %, se calcula por la fórmula

$$W = \frac{G_2 - G_1}{G_1} \cdot 100, \quad (10)$$

donde G_1 es la masa de la muestra del material en estado seco, g, y G_2 es la masa de la muestra del material después de mantenerlo en el agua durante 24 horas, g.

La resistencia al clima tropical se determina para los materiales electroaislantes destinados para los equipos eléctricos que deben funcionar en las condiciones del clima tropical.

Aquí los materiales electroaislantes no protegidos por envolturas herméticamente cerradas se someten a los siguientes influjos: elevada temperatura del aire circundante (de 45 a 55 °C); brusca variación de la temperatura en el transcurso del día (en 40 °C y más); elevada humedad del aire (de 90 a 95 %); radiación solar (gran densidad de los flujos luminoso y térmico); enmohecimiento (por hongos microorgánicos), que deteriora muchos materiales electroaislantes de origen orgánico; insectos y roedores que dañan el aislamiento en los equipos eléctricos de tipo abierto; aire que contiene sales y polvo.

Los factores enumerados ejercen un efecto destructor sobre los materiales orgánicos, como son los tejidos de algodón y seda, y también sobre muchos plásticos con rellenos de madera. Estos materiales pueden emplearse solamente en caso de que se utilicen con cubiertas cerradas herméticamente, o protegidas por una capa gruesa de componentes resistentes al clima tropical, como el tipo de materiales epoxídicos y otros.

Los materiales de origen inorgánico, tales como la electrocerámica, el vidrio no alcalino y otros, son los más resistentes a los influjos del clima tropical. Muchos dieléctricos sintéticos de origen orgánico (de baquelita, epoxídicos, resinas de policloruro de vinilo y silicónicas, plásticos fluorocarbúricos y plásticos sobre la base de éstos con rellenos inorgánicos, como son las fibras de vidrio y asbesto, la harina de cuarzo, y asimismo las lacas, esmaltes y compuestos a base de estas resinas) tienen elevada resistencia a los influjos tropicales,

La resistencia de un material electroaislante o de un artículo al clima tropical se determina con ensayos especiales.

Preguntas de control

1. Enumere las características mecánicas (parámetros) de los materiales y denomine las unidades de su medición.
2. Enumere las características eléctricas (parámetros) de los materiales y denomine las unidades de su medición.
3. ¿Cómo varía la resistividad eléctrica de los dieléctricos, semiconductores y conductores en dependencia de su temperatura?
4. Enumere las características térmicas de los materiales.
5. Enumere las principales características físico-químicas de los materiales.

Capítulo II

Materiales electroaislantes

§ 6. Dieléctricos gaseiformes

A los dieléctricos gaseiformes pertenecen todos los gases y el aire, que es una mezcla de gases y vapores de agua. Muchos gases se utilizan en calidad de dieléctricos en los condensadores de gas, interruptores al aire comprimido de alta tensión y en otros dispositivos electrotécnicos. El aire rodea a todas las instalaciones eléctricas y, como dieléctrico, determina en alto grado la seguridad de su funcionamiento. Los conductores de las líneas de transporte de energía a alta tensión, fijados en los mástiles con ayuda de aisladores de porcelana o vidrio, están

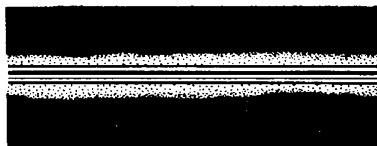


Fig. 8.
Corona eléctrica en el aire cerca de un conductor desnudo

aislados entre sí en toda su extensión solamente por una capa de aire. A veces, en la capa de aire que contacta directamente con la superficie de los conductores de alta tensión, se observa una luminiscencia violeta clara: la corona eléctrica (fig. 8) que va acompañada de un chisporroteo característico. La corona eléctrica surge al empeorar las propiedades electroaislantes del aire o durante el influjo sobre el aire de una tensión elevada. Ésta provoca pérdidas de energía, por lo que se debe luchar contra este fenómeno.

Las inclusiones gaseosas (burbujas de aire) en el interior del aislamiento sólido se encuentran en condicio-

nas de trabajo particularmente desfavorables. La intensidad (E) del campo eléctrico en las capas de aislamiento conectadas en serie se distribuye de manera inversamente proporcional a sus permitividades dieléctricas, es decir,

$$E_1/E_2 = \epsilon_2/\epsilon_1. \quad (11)$$

En muchos gases la permitividad (ϵ_1) es un poco mayor que la unidad (tabla 2), mientras que en los dieléctricos sólidos (ϵ_2) ésta se encuentra en los límites de

Tabla 2. Características fundamentales de los dieléctricos gaseiformes

Dieléctrico	Densidad, g/cm ³	Permiti- vidad dieléctrica	Rigidez eléctrica, MV/m	Coefficiente de con- ductibili- dad térmica*	Capacidad calorífi- ca*
Aire	1,2928	1,00057	3	1	1
Nitrógeno	1,2507	1,00058	3	1,08	1,05
Hidrógeno	0,0898	1,00026	1,8	6,69	14,35
Gas carbónico	1,9768	1,00098	2,7	0,64	0,85
Elegas**	6,4851	1,00491	7,2	1,25	0,6

* Los coeficientes de conductibilidad térmica y las capacidades caloríficas de los gases están expresados en unidades convencionales. Para el aire estos parámetros han sido admitidos por unidad.

** El elegas es el gas eléctrico artificial (SF₆) que se emplea en los aparatos eléctricos.

2 a 8 y más. Como resultado de ello las inclusiones gaseosas en el interior del aislamiento sólido se encontrarán bajo la acción de las intensidades que superan 2 . . . 8 veces las intensidades en el aislamiento sólido. Esto puede provocar la ionización de las inclusiones gaseiformes, es decir, la formación en ellas de una gran cantidad de partículas cargadas eléctricamente (electrones e iones*. Dicho fenómeno frecuentemente lleva tras sí la perforación del aislamiento, que puede provocar una avería de la máquina eléctrica, del aparato, del cable, etc. En condiciones de funcionamiento normales

* Las perforaciones locales de las inclusiones gaseiformes en el interior del dieléctrico sólido o líquido se denominan descargas parciales.

los dieléctricos gaseiformes tienen una conductibilidad muy pequeña y pérdidas dieléctricas insignificantes ($\text{tg } \delta \approx 10^{-6}$).

§ 7. Conductibilidad eléctrica de los dieléctricos gaseiformes

En todos los gases, antes de que actúe sobre ellos la tensión eléctrica, existe siempre cierta cantidad de partículas cargadas eléctricamente —electrones e iones— que se encuentran en movimiento térmico desordenado. Estas partículas pueden ser partículas de gas cargadas, y asimismo partículas de sustancias sólidas y líquidas cargadas, por ejemplo, de mezclas que se encuentran en el aire.

La formación en el aire de partículas cargadas eléctricamente está provocada por la ionización del gas por las fuentes externas de energía (ionizadores externos): rayos cósmicos y solares, radiaciones activas de la Tierra, y otras.

El proceso de ionización del gas por los ionizadores externos consiste en que éstos transmiten una parte de energía a los átomos del gas. Con esto, los electrones de valencia adquieren energía complementaria y se separan de sus átomos, que se transforman en partículas cargadas positivamente, iones positivos. Los electrones libres formados o bien pueden conservar durante largo tiempo su independencia de movimiento en el gas o bien, transcurrido cierto tiempo, se unen a los átomos y moléculas de gas eléctricamente neutrales, convirtiendo a éstos en iones cargados negativamente.

Al encontrarse en movimiento térmico desordenado cierta parte de las partículas de carga negativa (electrones) se reúnen con las de carga positiva (iones) formando átomos y moléculas de gas eléctricamente neutrales. Este proceso se denomina *restitución o recombinación*.

Si se coloca cualquier volumen de gas entre electrodos metálicos, al aplicar a éstos una tensión eléctrica, sobre las partículas de gas cargadas actuarán fuerzas eléctricas: la intensidad del campo eléctrico.

Bajo la acción de estas fuerzas los electrones y los

iones se desplazarán desde un electrodo hacia el otro, creando una corriente eléctrica en el gas.

La corriente en el gas será tanto mayor cuanto más partículas cargadas se originen en él en una unidad de tiempo y cuanto mayor velocidad adquieran éstas bajo la acción de las fuerzas del campo eléctrico. Es obvio que al aumentar la tensión aplicada al volumen dado de gas

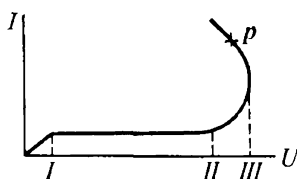


Fig. 9.

Característica corriente-tensión de un dieléctrico gaseiforme

aumentarán las fuerzas eléctricas que actúan sobre los electrones e iones. Con esto la velocidad de las partículas cargadas y, por consiguiente, la corriente en el gas aumentan.

La variación de la corriente en dependencia de la tensión aplicada al volumen de gas se expresa gráficamente en forma de una curva denominada *característica corriente-*

tensión (fig. 9). Esta última indica que en la zona de débiles campos eléctricos, cuando las fuerzas eléctricas que actúan sobre las partículas cargadas no son relativamente grandes (zona I en el gráfico), la corriente en el gas aumenta proporcionalmente a la tensión aplicada. En esta zona la variación de la corriente transcurre según la ley de Ohm.

Con el incremento sucesivo de la tensión (zona II) queda infringida la proporcionalidad entre la corriente y la tensión. En esta zona la corriente de conducción no depende de la tensión. Aquí tiene lugar el acumulamiento de energía por las partículas de gas cargadas: electrones e iones. Al aumentar aún más la tensión (zona III) la velocidad de las partículas cargadas acrecienta bruscamente, como resultado de lo cual tienen lugar frecuentes colisiones de éstas con las partículas neutrales de gas. Durante estos impactos elásticos los electrones y los iones transmiten a las partículas neutrales de gas una parte de la energía acumulada por ellos. Como resultado los electrones se separan de sus átomos. Con esto se originan nuevas partículas cargadas eléctricamente: los electrones libres y los iones.

Puesto que las partículas voladoras cargadas chocan frecuentemente con los átomos y moléculas de gas, la formación de partículas nuevas cargadas eléctricamente sucede muy intensivamente. Este proceso se denomina *ionización por choque de un gas*. En la zona de la ionización por choque (zona *III* en la fig. 9), durante el incremento mínimo de la tensión, aumenta intensamente la corriente en el gas. El proceso de ionización por choque en los dieléctricos gaseiformes va acompañado de una brusca reducción de la magnitud de la resistividad de volumen (ρ_v) del gas y del incremento de la tangente del ángulo de pérdidas dieléctricas ($\text{tg } \delta$).

Como es natural, los dieléctricos gaseiformes se pueden emplear a tensiones menores de aquellos valores a los que surge el proceso de ionización por choque. En este caso los gases son dieléctricos buenos, en los que la resistividad de volumen es muy grande ($\rho \approx 10^{18} \Omega \cdot \text{m}$) y la tangente del ángulo de pérdidas dieléctricas es ínfima ($\text{tg } \delta \approx 10^{-6}$).

§ 8. Perforación de los dieléctricos gaseiformes

El desarrollo del proceso de la ionización por choque en el gas conduce a la perforación del volumen de gas dado (punto *P* en la fig. 9). En el momento de la perforación del gas la corriente en él aumenta considerablemente, mientras que la tensión tiende hacia el cero. La perforación del gas sucede en forma de descarga por chispas, es decir, de chispas luminosas que unen la superficie de los electrodos metálicos instalados en el medio gaseoso.

El fenómeno de perforación de los dieléctricos gaseiformes en un campo eléctrico homogéneo* se expresa con la fórmula (ley de Paschen)

$$U_p = A p h, \quad (12)$$

donde U_p es la tensión de perforación (disruptiva) de la capa de gas; p es la presión del gas; h , la distancia entre

* Se denomina campo eléctrico homogéneo aquél en todos los puntos del cual las fuerzas eléctricas del campo (intensidad E) son iguales entre sí, siendo también igual en todas partes la densidad de las líneas de fuerza.

los electrodos en el gas; A es el coeficiente de proporcionalidad.

Según la ley de Paschen la magnitud de la tensión disruptiva de cualquier gas es proporcional al producto de la presión del gas por la distancia entre los electrodos (fig. 10). Así pues, la magnitud de la tensión disruptiva del gas aumenta con el incremento de la presión del gas

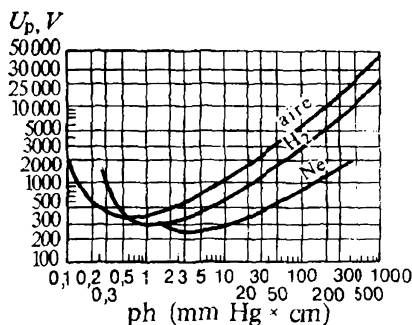


Fig. 10.

Dependencia entre la tensión disruptiva de los gases y el producto de la presión p del gas por la distancia h entre los electrodos

y aumento del espesor de la capa de gas entre los electrodos (parte derecha de la curva en la fig. 10). Por el contrario, al disminuir la presión y la distancia entre los electrodos la tensión disruptiva del gas minora, pero habiendo pasado un mínimo* comienza de nuevo a aumentar en la zona del gas rarificado o en la zona de las distancias pequeñas entre los electrodos (parte izquierda de la curva en U en la fig. 10). Esto es comprensible, pues en la zona del gas rarificado disminuye bruscamente la cantidad de átomos y moléculas de gas, que son los objetos de ionización, entonces el proceso de ionización por choque transcurre también a tensiones más elevadas.

En la zona de las distancias muy pequeñas entre los electrodos ($h = 0,1$ mm y menos) la perforación del gas

* Para el aire este mínimo $U_p = 280$ V.

sucede también a elevados valores de la tensión disruptiva. Ello se explica por la reducción de la longitud del trayecto en el que las partículas cargadas no pueden acumular la energía necesaria para realizar el proceso de ionización por choque. Para que tenga lugar semejante proceso se requieren tensiones mayores. Esto quiere decir que la capa de gas de menor espesor tiene mayor rigidez eléctrica que la de espesor más grande. De tal modo, con el aumento del espesor de la capa de gas la rigidez eléctrica de éste disminuye. Cuando la presión es normal y la distancia entre los electrodos es de 1 cm y más la rigidez eléctrica del aire $E_r \approx 3$ MV/m. Esta rigidez disminuye lentamente al aumentar el espesor de la capa de aire. En otros gases también se observa lo mismo. De los datos expuestos en la tabla 2 se deduce que el nitrógeno tiene una máxima rigidez eléctrica, mientras que el hidrógeno es poseedor de las máximas conductibilidad térmica y capacidad calorífica. Por esto, en las máquinas eléctricas de gran potencia (generadores), se utiliza ampliamente el hidrógeno en calidad de medio refrigerante (en lugar de aire).

La perforación del dieléctrico gaseiforme transcurre de diferente manera, según el grado de homogeneidad del campo eléctrico en el gas. Así, la perforación en el aire al existir en éste un campo eléctrico homogéneo transcurre inmediatamente en forma de chispa. Esta descarga por chispas puede convertirse en arco eléctrico, si es suficiente la potencia de la fuente de corriente.

Por el contrario, la perforación del gas en un campo eléctrico heterogéneo pasa a través de una serie de fases intermedias. Al principio comienza una destrucción eléctrica reducida de la capa de gas en el electrodo de radio menor, ya que en la superficie de éste se observa una intensidad máxima del campo eléctrico. Después, al elevar la tensión en la superficie del electrodo de radio pequeño (punta, conductor de pequeño diámetro y otros), en el gas surge una descarga por efecto corona, una corona eléctrica visible (véase la fig. 8). Ésta es una luminiscencia de color violeta claro en la capa de aire cerca del electrodo de menor radio. La corona eléctrica va acompañada de un chisporroteo y de la formación de ozono O_3 y de

óxido nítrico NO en el aire. Estos gases son oxidantes activos de los metales y de muchos materiales electroaislantes de origen orgánico (gomas, plásticos y otros). Bajo la acción del ozono y de los óxidos nítricos la mayoría de los dieléctricos orgánicos se destruye. Con el incremento ulterior de la tensión la descarga por efecto corona se transforma en descarga por chispas, es decir, tiene lugar una destrucción eléctrica total del gas.

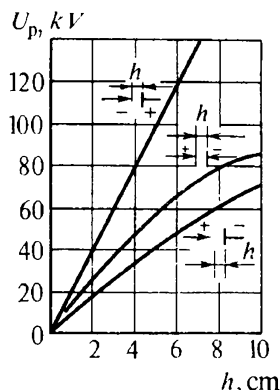


Fig. 11.
Dependencia de la tensión disruptiva del aire entre los electrodos: punta-plano y punta-punta para distintas polaridades de la punta

otros. Efectivamente, cerca de la punta el espesor de las líneas de fuerza es muy grande y, por consiguiente, aquí actúan intensidades de gran magnitud que pueden provocar la ionización del gas por choque. A medida que nos alejamos de la punta hacia el plano el espesor de las líneas de fuerza disminuye y, por lo tanto, las intensidades del campo eléctrico disminuyen también. Con esto, su efecto ionizante sobre las partículas de gas disminuye.

Las regularidades respecto a la perforación del gas entre electrodos típicos se observan en muchos elementos de las instalaciones de alta tensión (líneas de transporte de energía, interruptores al aire y otros). La polaridad

Se debe advertir que la perforación del gas en el campo eléctrico homogéneo, como regla, transcurre a mayor tensión en comparación con la perforación de la misma capa de gas en un campo eléctrico heterogéneo.

En la práctica, fundamentalmente, se encuentran campos eléctricos heterogéneos. Éstos se observan entre dos conductores contiguos de alta tensión, entre el conductor y el mástil con puesta a tierra en las líneas de transporte de energía, y en otros casos.

Los electrodos típicos, entre los que se originan campos eléctricos heterogéneos, son: punta-plano, punta-punta y algunos

de los electrodos ejerce gran influjo sobre la perforación del gas en el campo heterogéneo. Para la capa de gas de un mismo espesor, cuando la punta es positiva (aguja) y el plano está cargado negativamente, la tensión disruptiva es considerablemente menor que cuando la punta es negativa (fig. 11). Esto se explica por la acumulación de los iones cargados positivamente cerca de la punta y su difusión en dirección del plano cargado negativamente. Como resultado de ello parece como si la punta brotara en el espesor del gas, reduciendo la trayectoria a la descarga por chispas. Con esto la perforación del gas sucede a tensiones relativamente pequeñas.

Cuando la punta tiene carga negativa, las tensiones disruptivas son superiores que en el caso de punta positiva. Las tensiones disruptivas del aire entre dos puntas están por encima de las del caso punta—plano (cuando la punta es positiva). Se explica esto por ser el campo eléctrico entre las dos puntas de heterogeneidad algo menor. Para evitar el surgimiento de la corona eléctrica y elevar la magnitud de la tensión disruptiva del dieléctrico gaseiforme se procura redondear los bordes agudos de los electrodos, o taparlos con caperuzas (pantallas) metálicas de mayor diámetro.

Antes se examinaron fenómenos de perforación del gas cuando no habían en él dieléctricos sólidos. En la práctica se encuentran frecuentemente casos de perforación del gas en el límite con un dieléctrico sólido. Un ejemplo de ello es el salto superficial de chispa de un aislador de porcelana. Este salto es la perforación de la capa de aire en la superficie del dieléctrico sólido. En todos los casos de perforación del aire en el límite con un dieléctrico sólido la tensión disruptiva es menor que sería ésta para la misma distancia en el gas si no existiera el dieléctrico sólido.

§ 9. Noción general de los dieléctricos líquidos

Los dieléctricos líquidos se utilizan ampliamente en las instalaciones electrotécnicas. Con ellos se rellena el espacio interior de los transformadores de alimentación,

reactores, interruptores de aceite, condensadores, cables y otros elementos de los equipos eléctricos. Los dieléctricos líquidos, que se vierten al vacío en los equipos eléctricos, impregnan bien el aislamiento poroso de los arrollamientos, cartones y otros materiales electroaislantes porosos, elevando considerablemente su rigidez eléctrica. Al mismo tiempo los dieléctricos líquidos cumplen el papel de medio transferente del calor. Así, el aceite aislante en los transformadores se calienta en los arrollamientos y después, desplazándose hacia las paredes frías de la cuba del transformador, transfiere a éstas el calor adquirido. En los interruptores de aceite el dieléctrico líquido no sólo aísla las partes conductoras sino a su vez cumple el papel de agente que apaga el arco eléctrico que surge entre los contactos del interruptor en accionamiento.

En calidad de dieléctricos líquidos encuentran mayor empleo los aceites electroaislantes de petróleo. Éstos se clasifican en tres grupos: para transformadores e interruptores de alta tensión; para la impregnación del aislamiento de papel de los condensadores; para cables de alta tensión. Los aceites sintéticos, sovol, sovtoles y ПЭСЖ (PESZh) («Caloría-2»), encuentran menos empleo.

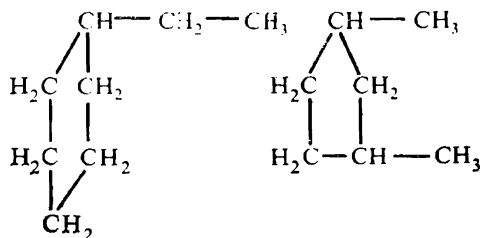
§ 10. Aceites de petróleo

Los aceites de petróleo (minerales) electroaislantes se obtienen mediante el método de la destilación fraccionada (diferencial) del petróleo. Éste es un proceso complejo, que consta de una serie de operaciones y como resultado de él se obtiene el aceite solar. Mediante un tratamiento sucesivo del aceite solar con ácido sulfúrico y álcali se separan de él los compuestos químicamente inestables. Después de la refinación, secado y filtración se obtiene el aceite electroaislante para transformadores, condensadores y cables. Los aceites para condensadores y cables se distinguen por ser de una refinación más profunda de las impurezas y, por consiguiente, tienen un nivel más elevado de sus características eléctricas.

La composición química de los aceites de petróleo queda determinada por la composición del petróleo. Todos

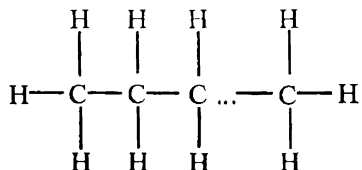
los aceites electroaislantes de petróleo son mezclas de hidrocarburos de las series nafténica, parafínica y aromática.

Los hidrocarburos nafténicos son compuestos del carbono con el hidrógeno en forma de anillos cerrados con cadenas laterales, por lo que frecuentemente se denominan hidrocarburos cíclicos.



Estos hidrocarburos son resistentes a la oxidación, por lo que se emplean en la composición de los aceites. Su contenido en el aceite alcanza un 70 . . . 80%.

Los hidrocarburos de la serie parafínica son compuestos del carbono y del hidrógeno en forma de moléculas de estructura en cadena.



Como se ve de esta fórmula las cadenas pueden ser de distinta longitud, en dependencia de la cantidad de átomos de carbono ligados entre sí. Los hidrocarburos de la serie parafínica son químicamente estables, es decir, son resistentes a la oxidación.

Los hidrocarburos aromáticos son también compuestos cíclicos del carbono con el hidrógeno, resistentes a la oxidación. Se ha constatado que la extracción del aceite electroaislante a partir de estos hidrocarburos conduce a la oxidación rápida de éste, no obstante, una cantidad excesiva de hidrocarburos aromáticos en la composición

del aceite disminuye la temperatura de inflamación de sus vapores y provoca precipitaciones. Como resultado de ello empeoran las características eléctricas del aceite. La cantidad de hidrocarburos aromáticos en el aceite no supera el 10...12%.

En la composición de los aceites electroaislantes de petróleo entran también otros componentes: ácidos orgánicos, sustancias resiníferas, combinaciones sulfurosas y una pequeña cantidad de hidrocarburos no saturados, inestables a la oxidación.

En la producción de cables de potencia con aislamiento de papel también se utiliza una gran cantidad de aceites de petróleo.

Los aceites para cables eléctricos, según su viscosidad, se dividen en: aceites MH-2 (MN-2) de pequeña viscosidad; aceites de viscosidad media C-110 y C-220; aceites viscosos.

El aceite MH-2 de poca viscosidad se emplea en los cables de aceite de presiones baja y media (hasta $3 \cdot 10^5$ Pa). Para semejantes cables es imprescindible la pequeña viscosidad del aceite, pues así se asegura la alimentación del cable con aceite a través de canales relativamente pequeños a cualesquiera temperaturas de funcionamiento.

Los aceites C-110 y C-220 de viscosidad media se designan para la impregnación y relleno de los cables de aceite de alta tensión (110 kV y más) a una presión de casi $14 \cdot 10^5$ Pa. Estos aceites no contienen en su composición ni hidrocarburos aromáticos ni sustancias resiníferas. Estos aceites son una mezcla técnicamente pura de hidrocarburos nafténicos y parafínicos, por lo que tienen características eléctricas muy estables.

El aceite más viscoso se emplea para los cables con aislamiento de papel hasta 35 kV, en los que el aceite de petróleo con colofonia disuelta en él es la sustancia líquida impregnante. En estos cables el aislamiento líquido no se encuentra a sobrepresión alguna, y la elevada viscosidad del aceite impregnante permite evitar su corrimiento en el cable durante los tendidos inclinados o verticales de éste.

En la tabla 3 se exponen las características fundamentales de los aceites de petróleo electroaislantes.

* Tabla 3. Características fundamentales de los aceites de petróleo electroaislantes

Características	Unidades de medida	Aceite para transformadores	Aceite para condensadores	Aceites para cables eléctricos	
				MH-2	C-220
Densidad	kg/m ³	885...890	860	890	840
Viscosidad: a 20 °C a 50 °C	m ² /s	30.10 ⁻⁶	4.10 ⁻⁶	36.10 ⁻⁶	800.10 ⁻⁶
	m ² /s	8.10 ⁻⁶	10.10 ⁻⁶	9.10 ⁻⁶	60.10 ⁻⁶
Temperatura de inflamación de los vapores (no inferior a)	°C	135	135	135	180
Temperatura de solidificación (no superior a)	°C	-45	-45	-45	-30
Resistividad de volumen a 20 °C	Ω·m	10 ¹² ...10 ¹³	10 ¹³ ...10 ¹⁴	10 ¹² ...10 ¹³	10 ¹³
Índice de acidez	mg KOH/g	0,03...0,05	0,04...0,02	0,04	0,02
Permitividad dieléctrica	—	2,2...2,4	2,2	2,3	2,1
Tangente del ángulo de pérdidas dieléctricas a 50 Hz	—	0,003...0,005	0,002...0,003	0,003	0,003
Rigidez eléctrica a 20 °C	MV/m	48	20	18	20

En el proceso de su explotación todos los aceites se encuentran bajo los efectos de temperaturas elevadas, del campo eléctrico, y asimismo contactan con las partes metálicas de los equipos eléctricos. En ciertos tipos de los equipos eléctricos el aceite contacta con el aire atmosférico. Todos los factores enumerados provocan el envejecimiento del aceite, en cuya base se encuentra su oxidación. El envejecimiento del aceite se acelera por los catalizadores metálicos: cobre, latón, hierro y otros metales. La presencia del agua en el aceite acelera también el proceso de su envejecimiento. Durante el envejecimiento en el aceite se forman mezclas sólidas resinosas solubles e insolubles en el aceite caliente. Semejantes impurezas se precipitan en forma de sedimentos en los arrollamientos y otras partes de los transformadores, hecho que dificulta la evacuación del calor de las partes que se calientan. Las mezclas, al ser solubles en el aceite, empeoran considerablemente sus propiedades eléctricas. En el proceso del envejecimiento del aceite en éste se originan ácidos y humedades que reducen considerablemente el nivel de aislamiento en los transformadores, cables y en otros tipos de equipos eléctricos.

Para disminuir el envejecimiento de los aceites en ellos se introducen sustancias que retienen la oxidación: los inhibidores. No obstante, la adición de inhibidores no puede proteger totalmente al aceite contra el envejecimiento. Por esto, los aceites electroaislantes se deben conservar y transportar en embalaje seco, se deben bombear por conductos metálicos limpios (pero no por mangueras de goma que, al disolverse, contaminan el aceite). En las condiciones de explotación el aceite debe conservarse contra la penetración en él de aire y de humedad. Las tapas de los aparatos rellenos de aceite deben cerrarse herméticamente y tener conservadores, es decir, recipientes complementarios. A veces, en los transformadores, el espacio sobre el nivel del aceite se rellena de gas inerte, por ejemplo, de nitrógeno, que protege al aceite contra la oxidación.

A pesar de las medidas para conservar al aceite contra el envejecimiento éste, no obstante, se oxida, y con el tiempo surgen en él productos sólidos y líquidos de la

oxidación y agua. Por eso, es necesario que de vez en cuando se limpie de las impurezas y del agua el aceite que se encuentra en servicio, e incluso restablecer sus propiedades. El agua se puede separar del aceite mediante la evaporación, calentando el aceite hasta la temperatura de ebullición del agua. Sin embargo, cualquier calentamiento del aceite al existir acceso del aire lo deteriora, por lo que el secado del aceite se efectúa en instalaciones especiales al vacío. Con esto, en primer lugar, se elimina en grado considerable el aire y, por consiguiente, el oxígeno, y, en segundo lugar, se reduce la temperatura de ebullición del agua, es decir, se facilita su evaporación.

En la fig. 12 se expone el esquema de secamiento del aceite al pulverizarlo en el vacío. El aceite, en estado disperso, con la bomba 2 a través del filtro 1, intercambiador de calor 3 y electrore calentador 8, se traslada a la caldera de vacío 7, de la que se bombean los vapores de agua y gas (con la bomba de vacío 5). Luego el aceite se traslada con la bomba 6 a través del intercambiador de calor 3 y del filtro prensa 4, y después ingresa directamente en el transformador o en el embalaje. En este caso el aceite se libera del agua y de las impurezas.

Con ayuda de la centrifugadora el aceite se puede depurar de las sustancias sólidas extrañas, ya que éstas, que tienen mayor densidad que el aceite, se arrojan hacia las paredes de la centrifugadora y se eliminan. Aquí el aceite se somete a una división en películas finas, por lo que existe el peligro de su oxidación, ya que para una mejor refinación y reducción de la viscosidad el aceite se deja pasar a través de la centrifuga en estado caliente (hasta 40...60 °C).

Los dieléctricos líquidos también se depuran del agua y de las partículas sólidas con ayuda del filtro prensa, a través del cual se bombea a presión (3...5)·10⁵ Pa el líquido aislante en estado caliente. Éste pasa a través de un sistema de tabiques de cartón para filtrar. Las partículas sólidas de contaminación se depositan en la superficie de las láminas de cartón, mientras que las paredes de sus capilares absorben la humedad, pero dejan pasar al dieléctrico líquido, depurado y seco.

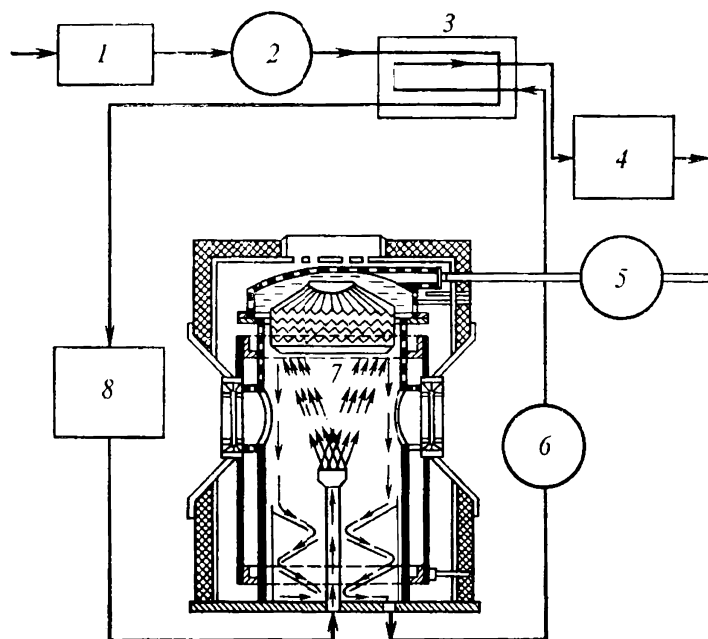


Fig. 12.

Esquema de secado del aceite mediante su pulverización en el vacío:

1, filtro preliminar; 2, 5, 6, bombas; 3, intercambiador de calor; 4, filtro prensa; 7, caldera de vacío; 8, electrocalentador

El aceite muy oxidado, con índice de acidez mayor que 0,4 mg KOH/g, que sufrió el proceso de profundo envejecimiento, requiere reactivación (regeneración). Existen varios procedimientos de regeneración del aceite. Los aceites más oxidados y envejecidos se regeneran mediante el método del ácido-alcalino-térreo. En este caso, en el aceite a regenerar, se introduce de 0,5 a 2% de ácido sulfúrico concentrado. El ácido aglutina todos los compuestos inestables y los transforma en alquitrán ácido. El aceite sedimentado después de esto se somete a un tratamiento con álcali para neutralizar los ácidos orgánicos y los residuos de ácido sulfúrico. Seguidamente el aceite se lava con agua destilada y se somete a un tra-

tamiento con adsorbentes*, después de lo cual se filtra a través de un filtro prensa o se deja pasar a través de la centrifugadora.

§ 11. Dieléctricos sintéticos líquidos

La combustibilidad, la temperatura relativamente pequeña de inflamación de los vapores y la pequeña magnitud de la permitividad son imperfecciones de los aceites electroaislantes de petróleo. Los líquidos sintéticos, compuestos de hidrocarburos clorurados, carecen de dichos defectos. El sovol es un representante típico de estos dieléctricos. El sovol se fabrica mediante la cloración de una sustancia cristalina fundida: el difenilo, $\text{H}_5\text{C}_6 - \text{C}_6\text{H}_5$.

A través del difenilo fundido se deja pasar el cloro en presencia del catalizador (estaño, hierro y otros). Con esto tiene lugar la reacción de sustitución de los átomos de hidrógeno por los átomos de cloro en las moléculas de difenilo. Si se sustituyen más de cuatro átomos de hidrógeno el producto obtenido es de constitución oleosa. En el sovol los átomos de cloro sustituyen cinco átomos de hidrógeno $\text{Cl}_3\text{H}_2\text{C}_6 - \text{C}_6\text{H}_3\text{Cl}_2$.

Puesto que las moléculas de sovol están construidas asimétricamente éstas son polares, y el sovol es un dieléctrico polar. Su permitividad $\epsilon = 5,2$, es decir, coincide con la magnitud de la permitividad de los papeles aislantes eléctricos, hecho que aumenta la capacidad de los condensadores y eleva la rigidez eléctrica (E_r) del aislamiento de papel. Por esto el sovol se emplea en los condensadores de papel en calidad de sustancia impregnante. La magnitud $\text{tg } \delta$ del sovol es algo superior que la de los aceites de petróleo, y su rigidez eléctrica se aproxima a la rigidez eléctrica de los aceites aislantes de petróleo.

El sovol es una sustancia incombustible, lo que representa su principal ventaja en comparación con los aceites de petróleo. No obstante, el sovol tiene defectos considerables, que limitan su utilización. La tempera-

* Polvos de dispersión fina que poseen de un poder de adsorción selectivo.

tura de solidificación del sovol es de 5 °C. Además, el sovol tiene una viscosidad grande, que a la temperatura de 40 °C es de $(290) \cdot 10^{-6}$ m²/s, mientras que la del aceite de petróleo a 20 °C es igual a $30 \cdot 10^{-6}$ m²/s. Lo dicho excluye la impregnación del papel a la temperatura ambiente y exige el calentamiento del sovol hasta la temperatura de 50 °C.

La toxicidad del sovol es uno de sus grandes defectos y se debe a la existencia de cloro en él. Por esto el sovol debe conservarse en un embalaje que se pueda cerrar bien. Al trabajar con el sovol se debe tener precaución ya que éste provoca la irritación de la membrana mucosa.

Con el fin de rebajar la viscosidad del sovol y conservar su incombustibilidad se encontró para él un diluyente en forma de líquido incombustible: el triclorobenceno $C_6H_3Cl_3$. La mezcla de 64 % de sovol y 36 % de triclorobenceno obtuvo el nombre de sovtol-2, y la mezcla de 90 % de sovol y 10 % de triclorobenceno se llama sovtol-10. Estos líquidos encuentran empleo en la producción de condensadores de papel y en transformadores especiales. El sovol y los sovtol no se inflaman, pero sus vapores dan inflamaciones que no provocan el encendido de los mismos líquidos. El sovol y los aceites preparados a base de éste ecológicamente son peligrosos y su empleo es muy limitado.

La obtención de líquidos silicónicos (siliconas) con temperatura de congelación muy baja (-60 °C), estabilidad de las características eléctricas en un amplio intervalo de temperaturas y elevada resistencia a la oxidación fue un logro considerable en la rama de elaboración de dieléctricos sintéticos líquidos. Una de las siliconas que se utilizan ampliamente en ПЭСЖ (PESZh) (ПЭС-Д) (PES-D). Este líquido pertenece al grupo de dieléctricos silicónicos cuyas moléculas representan cadenas lineales del tipo

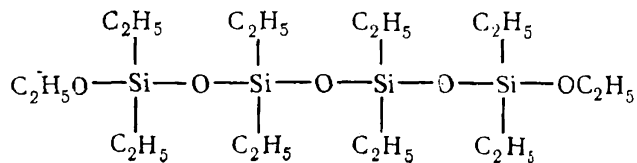


Tabla 4. Características fundamentales de los líquidos sintéticos aislantes

Características	Unidades de medida	Sovol	Sovtol-2	Sovtol-10	ИЗОК (ИЗО-П)
Densidad	kg/m ³	156)	152)	154)	96)
Viscosidad:					
a 2) °C	m ² /s	29) · 10 ⁻⁶ (a 40 °C)	115 · 10 ⁻⁶	650 · 10 ⁻⁶	80 · 10 ⁻⁶
a 65 °C	m ² /s	28 · 10 ⁻⁶	3,4 · 10 ⁻⁶	25 · 10 ⁻⁶	—
Temperatura de inflamación de los vapores (no menos de)	°C	20)	200	200	150
Temperatura de solidificación (no más de)	°C	+5	-4)	-7	-6)
Índice de acidez	mg KOH/g	0,02	0,01	0,01	—
Resistividad de volumen a 2) °C	Ω·m	10 ¹³	10 ¹²	10 ¹²	10 ¹⁴
Permitividad dieléctrica	—	5,2	4,6	4,8	2,6
Tangente del ángulo de pérdidas dieléctricas a 5) Hz	—	0,005	0,008	0,006	0,003
Rigidez eléctrica a 65 °C	MV/m	18	20	2)	25 (a 2) °C)

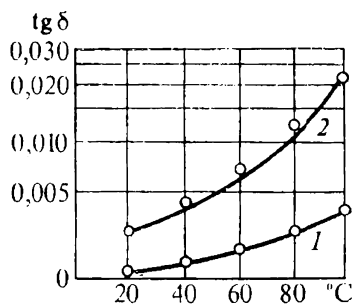


Fig. 13.
Dependencia entre la tangente del ángulo de pérdidas dieléctricas del aceite de petróleo y la temperatura (a 50 Hz)

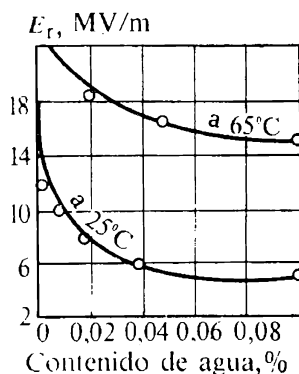


Fig. 14.
Dependencia entre la rigidez eléctrica del aceite de petróleo y el contenido de agua en él (para diversas temperaturas del aceite)

Las características fundamentales de los dieléctricos líquidos sintéticos se exponen en la tabla 4. Al comparar los datos de las tablas 3 y 4 se ve que las características eléctricas de los líquidos sintéticos pierden primacía de nivel ante las características correspondientes de los aceites de petróleo de buena refinación.

Se debe señalar que todos los líquidos electroaislantes son muy higroscópicos, y la presencia en ellos de humedad e impurezas empeoran considerablemente sus características eléctricas (figs. 13 y 14). Los líquidos electroaislantes se deben conservar en embalaje hermético.

§ 12. Conductibilidad eléctrica y perforación de los dieléctricos líquidos

La conductibilidad eléctrica de los dieléctricos líquidos está determinada por el desplazamiento de los iones. Estos últimos se forman como resultado de la disociación (desintegración) de las moléculas de las impurezas (agua, ácidos y otras) y, parcialmente, de las moléculas del propio dieléctrico líquido.

En los dieléctricos líquidos contaminados que se en-

cuentran en estado de explotación, además de la conductibilidad iónica eléctrica, existe también la conductibilidad iónica molar. Esta conductibilidad queda condicionada por el desplazamiento de partículas coloidales de agua y sustancias resinosas cargadas eléctricamente, que se forman como resultado del envejecimiento de los dieléctricos líquidos. El crecimiento de la tangente del ángulo de pérdidas dieléctricas debido al aumento de la temperatura (véase la fig. 13) está condicionado por el incremento de la conductibilidad eléctrica de los dieléctricos líquidos. En el dieléctrico líquido refinado el crecimiento de $\text{tg } \delta$ es considerablemente menor en comparación con el dieléctrico que ya se utilizó. Esto se explica porque la electroconductibilidad del dieléctrico refinado es considerablemente menor.

La rigidez eléctrica de los dieléctricos líquidos depende en gran parte de las partículas coloidales de agua, sustancias resinosas y otras impurezas existentes en ellos en estado de suspensión. Bajo la acción de las fuerzas eléctricas las partículas de agua o de sustancias resinosas, que tienen carga eléctrica, se alinean en forma de cadenas por las que se desarrolla la carga eléctrica, es decir, tiene lugar la perforación del dieléctrico líquido. Con el aumento del contenido de agua la rigidez eléctrica del dieléctrico líquido disminuye considerablemente (véase la fig. 14). Al elevar la temperatura una parte de las partículas coloidales de agua o de sustancias resinosas se disuelve, y se dificulta la formación del canal conductor de corriente en el dieléctrico líquido. Debido a ello aumenta la rigidez eléctrica del dieléctrico líquido (véase la fig. 14).

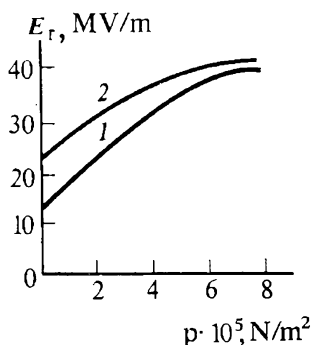


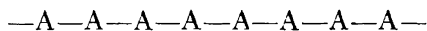
Fig. 15.
Dependencia entre la rigidez eléctrica del aceite de petróleo y la presión:
1, aceite técnico; 2, aceite degasificado

Las burbujas de gas se portan de manera análoga a las partículas coloidales de agua. Estando ionizadas, bajo la acción de las fuerzas eléctricas, forman un canal de gas entre las partes metálicas que se encuentran bajo alta tensión. En este caso la descarga eléctrica sucede en el canal de gas. La rigidez eléctrica de los dieléctricos líquidos, que contienen aire y otros gases, depende en gran parte de la presión (fig. 15), hecho que concuerda con la ley de Paschen*. La rigidez eléctrica de un dieléctrico líquido degasificado depende de la presión en menor grado. El mejoramiento de las características eléctricas de los dieléctricos líquidos se logra mediante su refinación escrupulosa de distintas impurezas y humedad, y asimismo degasificándolos, es decir, con un tratamiento de los dieléctricos líquidos en vacío.

§ 13. Materiales sólidos superpolímeros

Los materiales superpolímeros se componen de moléculas de gran tamaño. Estas últimas incluyen en sí decenas y centenas de miles de moléculas de algunas sustancias simples, denominadas *monómeros*. Los monómeros son sustancias que participan fácilmente en las reacciones químicas. Como resultado de estas reacciones se forma precisamente una sustancia nueva superpolímera (polímero) de gran masa molecular.

En las moléculas del polímero las del monómero están fijadas sólidamente unas a otras por las fuerzas de los enlaces químicos, lo que convencionalmente se expresa con rayitas. Por ejemplo, las moléculas de la sustancia original «A» se unen formando una molécula de la nueva sustancia



Las moléculas grandes de los polímeros pueden tener la forma de hilos estirados a lo largo, es decir, tener estructura lineal.

Los polímeros que se componen de moléculas que tienen estructura lineal se denominan *polímeros lineales*.

* Véase § 8.

Éstos son capaces de ablandarse durante su calentamiento, es decir, son *materiales termoplásticos*.

Existen polímeros que se componen de moléculas desarrolladas en el espacio en tres direcciones. Semejantes polímeros se denominan *tridimensionales*. Éstos son relativamente frágiles y, como regla, no se ablandan durante su calentamiento, es decir, son *materiales termofijos*.

Los polímeros pueden tener estructura amorfa o cristalina. Ciertos polímeros pueden ser mixtos: cristalinos y amorfos.

Las sustancias superpolímeras pueden ser naturales (ámbar, caucho natural y otras) y sintéticas (poliestireno, policloruro de vinilo, y otras).

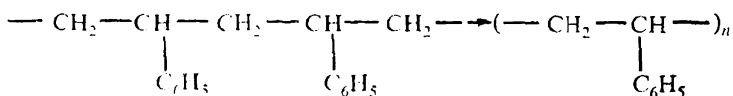
Debido a la escasez de las propiedades de los polímeros naturales la electrotécnica moderna utiliza, fundamentalmente, los dieléctricos sintéticos superpolímeros. Éstos pueden ser obtenidos como resultado de las reacciones químicas de polimerización o policondensación y, respectivamente, se denominan dieléctricos polimerizados o policondensados.

§ 14. Dieléctricos sólidos polimerizados

La *polimerización* es el proceso de combinación de las moléculas de la sustancia de partida (monomérica) en moléculas grandes de sustancia superpolimérica sin variar su composición elemental.

Examinemos en calidad de ejemplo el proceso de obtención del dieléctrico sintético: poliestireno. Éste se obtiene como resultado de la polimerización de la sustancia inicial: estireno, que representa un líquido transparente incoloro que hierve a la temperatura de 145 °C. Si se introduce en ésta el peróxido de benzoílo (de 0,1 a 0,5 % en masa) entonces, al calentar la mezcla hasta 110 °C, comienza la reacción de polimerización. Con esto el enlace químico doble en las moléculas de estireno $\text{H}_2\text{C} = \text{CH} - \text{C}_6\text{H}_5$ se rompe y pasa a la molécula idéntica contigua. Como resultado de ello las moléculas de estireno se unen formando una molécula grande de sustancia superpolímera: poliestireno.

Este proceso se puede escribir en forma del esquema siguiente:



n es el grado de polimerización del poliestireno*.

En la fase inicial el poliestireno es un líquido espeso transparente que se vierte en moldes de cristal calentados, en los que termina el proceso de polimerización. De los moldes se obtiene un material transparente sólido en forma de placas y barras. El poliestireno se puede obtener también en gránulos (que son partículas de forma cilíndrica de 3 a 5 mm de diámetro y de 8 a 10 mm de longitud) o en forma de polvo (poliestireno emulsivo).

Las características principales del poliestireno son: densidad 1050 kg/m^3 ; $\sigma_t = (300 \dots 500) \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$; $a = 12 \dots 18 \text{ kJ/m}^2$; resistencia al calor (según Martens) $75 \dots 80^\circ\text{C}$; higroscopia $0,03\%$ en masa; resistencia al frío -60°C ; $\rho_p = 10^{13} \dots 10^{14} \Omega \cdot \text{m}$; $\epsilon = 2,4$; $\text{tg } \delta = (2 \dots 4) \cdot 10^{-4}$; $E_r = 25 \dots 30 \text{ MV/m}$.

El poliestireno es un dieléctrico termoplástico que se ablanda a $110 \dots 120^\circ\text{C}$; se disuelve en disolventes no polares: benceno, tolueno, xileno, tetracloruro de carbono y algunos otros líquidos no polares.

Los armazones de bobina, los cuadros aislantes, las bases y los aisladores para los aparatos de medida eléctrica se fabrican de poliestireno.

El poliestireno se compone de moléculas de estructura lineal, pero dispuestas en el material de manera caótica. El estirado del poliestireno ablandado a través de rendijas-filtros (extrusión) permite orientar las moléculas en la dirección del estirado del material y obtener películas flexibles de poliestireno (estirenopelículas) desde 20 hasta $100 \mu\text{m}$ de espesor y de 10 a 300 mm de ancho. Estas poseen propiedades electroaislantes tan elevadas como el poliestireno en capa gruesa, y la rigidez eléctrica de las

* n es el grado de polimerización, indica el número de moléculas de sustancia de partida (monómero) de las que consta una molécula del polímero.

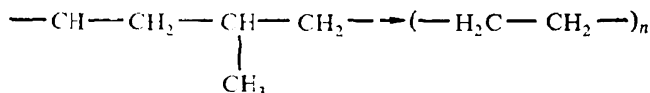
películas de poliestireno es considerablemente mayor: $E_r = 80...100$ MV/m. Las películas de poliestireno se emplean para el aislamiento de las almas de los cables de alta frecuencia, y en la producción de condensadores.

El defecto principal del poliestireno y de las piezas fabricadas de éste es su fragilidad, es decir, su resiliencia relativamente pequeña y su propensión al agrietamiento. En los poliestirenos antichoque (mezcla de poliestireno con cauchos sintéticos o copolímeros de estireno con ciertos cauchos sintéticos) estos defectos han sido eliminados considerablemente. Los poliestirenos antichoque se distinguen por su resiliencia de valores elevados ($a = 40...50$ kJ/m²) y por su permitividad también algo grande ($\epsilon = 3,0...3,6$). Las características restantes del poliestireno antichoque, prácticamente, permanecen al mismo nivel que las de las especies normales de poliestireno. El poliestireno antichoque se fabrica en gránulas.

El polietileno es un material sólido opaco de color blanco o gris claro, algo graso a tientas, que se obtiene del gas etileno ($H_2C = CH_2$) mediante su polimerización a presión.

Se distingue el polietileno de alta presión (AP), presión media (PM) y baja presión (BP)*.

El proceso de obtención del polietileno de alta presión transcurre a presiones de $1500 \cdot 10^5$ Pa y a temperaturas de 180 a 200 °C en presencia del oxígeno (0,05 %). El polietileno de baja presión se obtiene a una presión de $(1...5) \cdot 10^5$ Pa y temperatura de 60 °C, pero con la utilización de catalizadores especiales. El polietileno de presión media se obtiene a la presión de $30 \cdot 10^5$ Pa y temperatura de 130...140 °C. En todos los casos se forma una molécula de estructura lineal con una cantidad pequeña de grupos metilos laterales CH_3



* El polietileno de AP se denomina también polietileno de baja densidad, y los polietilenos de PM y PB se denominan polietilenos de alta densidad.

El grado de polimerización de los polietilenos $n = 3000 \dots 5000$, y la masa molecular es de 20 000 a 400 000 y más.

Los polietilenos de BP y PM se distinguen de los de AP por ser de densidad algo mayor, elevada resistencia mecánica y mayor rigidez, pero son menos estables al envejecimiento térmico.

Los polietilenos contienen desde 55 (AP) hasta 90 % (PM) de sustancia cristalina, por lo que ellos tienen una temperatura de fusión claramente manifestada que se encuentra en los límites desde 108 °C (AP); 125 °C (BP) hasta 130 °C (PM).

Los polietilenos son materiales termoplásticos. Ingresan en las fábricas en forma de gránulas. Los artículos de polietileno se obtienen mediante el método de moldeo por inyección, prensado en caliente y método de extrusión. Este último método se utiliza al aplicar el aislamiento de polietileno al conductor, y asimismo al fabricar mangueras aisladoras y tubos.

Del polietileno de AP se obtienen también películas aislantes semitransparentes de 30 a 200 μm y de grosor de 1 a 1,5 m de anchura.

De las clases más duras de polietileno (PM, BP) se fabrican artículos electroaislantes inflexibles: armazones de bobina, placas y otros. A la temperatura ambiente los polietilenos no se disuelven en ningún disolvente. Solamente a 70 °C y más los polietilenos se disuelven en el xileno, tetracloruro de carbono, en los hidrocarburos clorurados y en los aceites minerales.

Las características fundamentales de los polietilenos son: AP, densidad 920 kg/m^3 ; $\sigma_t = (100 \dots 150) \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$; durante el choque no se rompe; resistencia al calor (según Martens) 55...60 °C; PM, densidad 940 kg/m^3 ; $\sigma_t = 270 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$; durante el choque no se rompe; resistencia al calor 85 °C; BP, densidad 960 kg/m^3 ; $\sigma_t = 230 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$; durante el choque no se rompe; resistencia al calor 70 °C; la resistencia al frío de todos los polietilenos es de -60 °C; la higroscopicidad no excede 0,004% (en 30 días de su estancia en el agua).

Las características eléctricas de los polietilenos se encuentran, prácticamente, al mismo nivel que las de las

mejores clases de poliestirenos. Se debe anotar que todos los artículos de polietileno son inestables a la luz solar. Para elevar la resistencia a la luz en los polietilenos se introduce negro y otros colorantes. Los artículos de polietileno pueden soldarse entre sí.

El defecto fundamental del polietileno de AP es su moderada resistencia al calor (55...60 °C) y su tendencia a agrietarse durante las cargas mecánicas elevadas.

Para eliminar estas deficiencias el polietileno se somete a vulcanización introduciendo en él peróxidos orgánicos con tratamiento térmico ulterior. Con esto las moléculas lineales del polietileno se unen entre sí, formando moléculas grandes tridimensionales. Como resultado se obtiene polietileno vulcanizado de elevada resistencia al calor (hasta 90 °C) y al agrietamiento. Las características eléctricas del polietileno vulcanizado permanecen a un alto nivel. Otro procedimiento de mejoramiento de las propiedades termomecánicas de los polietilenos es el de influir sobre ellos con irradiación iónica, por ejemplo, de un flujo de electrones obtenidos del acelerador. Como resultado de semejante tratamiento se obtiene el aislamiento de los conductores y cables de polietileno irradiado, que se caracteriza por su elevada resistencia al calentamiento (hasta 100 °C) y mayor resistencia mecánica.

El policloruro de vinilo (cloruro de polivinilo) es un polvo de color blanco del que se obtienen, mediante el prensado en caliente o extrusión en caliente, artículos mecánicamente resistentes (placas, tubos y otros), estables a los aceites minerales, a muchos disolventes, álcalis y ácidos.

El policloruro de vinilo en forma de polvo se obtiene como resultado de la reacción de polimerización de la sustancia gaseosa, el cloruro de vinilo $\text{H}_2\text{C} = \text{CH} - \text{Cl}$, en presencia del peróxido de hidrógeno y otros.

La reacción se efectúa con cloruro de vinilo licuado en una disolución acuosa de sustancias alcalinas (polimerización en emulsión acuosa). El policloruro de vinilo, igual que el poliestireno y que el polietileno, es un material termoplástico. Mediante el prensado en caliente de policloruro de vinilo en polvo se obtiene un material sólido,

duro, el plástico vinílico en forma de chapas, placas, tubos y barras. Éste se distingue por ser químicamente resistente a los aceites minerales, álcalis y ácidos diluidos. Los artículos de plástico vinílico poseen una elevada resistencia mecánica, particularmente a las cargas de impacto, y tienen buenas propiedades electroaislantes.

Las características principales del plástico vinílico son: densidad 1350 kg/m^3 ; $\sigma_t = (400...500) \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$; $a = 100...120 \text{ kJ/m}^2$; resistencia al calor (según Martens) $60...70^\circ\text{C}$; resistencia al frío $-(15...25)^\circ\text{C}$; higroscopicidad $0,4...0,6 \%$ en masa; $\rho_v = 10^{10}...10^{12} \Omega \cdot \text{m}$; $\epsilon = 4$; $\text{tg } \delta = 0,01...0,02$; $E_r = 20...22 \text{ MV/m}$.

El plástico vinílico se moldea bien en moldes metálicos a la temperatura de 150 a 160°C . Los artículos de plástico vinílico son susceptibles a todo tipo de maquinado (torneado, fresado y otros), y también se sueldan y pegan con facilidad. Se pueden pintar de distintos colores. Con el policloruro de vinilo se fabrican cajas recipientes para acumuladores y diferentes piezas electroaislantes (placas y otras), resistentes a las cargas de impacto.

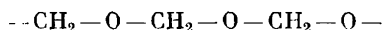
Son defectos del plástico vinílico su pequeña resistencia al frío y relativamente pequeña resistencia al calor. La descomposición del plástico vinílico comienza a la temperatura de 180 a 200°C .

El plástico de cloruro de polivinilo es un material flexible en rollos que se obtiene del polvo de cloruro de polivinilo mezclado con plastificantes: líquidos espesos aceitosos (ftalato dibutílico y otros). Los plastificantes se introducen de 30 a 45% . Además de los plastificantes en el plástico de cloruro de polivinilo se incluyen colorantes, cargas y estabilizadores térmicos. Todas estas sustancias se mezclan con la resina de cloruro de polivinilo en polvo y la mezcla obtenida se deja pasar varias veces entre cilindros de acero calientes. Como resultado de semejante transformación se obtiene un material flexible, elástico: el plástico de cloruro de polivinilo en forma de cintas de $0,8$ a $2,5 \text{ mm}$ de grosor y hasta 400 mm de ancho en rollos, y también en forma de migajas (gránulas). El plástico en láminas se fabrica en planchas de 1 a 5 mm de espesor y superficie de $600 \times 100 \text{ mm}^2$.

Las características fundamentales del plástico* son: densidad $1300...1400 \text{ kg/m}^3$; $\sigma_t = (180...250) \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$; resistencia al frío $(40...50)^\circ\text{C}$; higroscopicidad $0,2...0,5 \%$ en masa; temperatura de descomposición de 200 a 250°C ; $\rho_v = 10^8...10^{12} \Omega \cdot \text{m}$; $\Omega = 4...6$; $\text{tg } \delta = 0,05...0,08$; $E_r = 15...25 \text{ MV/m}$.

El plástico de cloruro de polivinilo se utiliza ampliamente en calidad de aislamiento principal de los conductores de montaje, y asimismo para la fabricación de las capas protectoras de las mangueras para cables. El plástico de cloruro de polivinilo, generalmente, está coloreado de negro, azul, amarillo, rojo y otros colores. Los colorantes se introducen en el plástico con el fin de proteger el material contra el envejecimiento a la luz, y también para distinguir los conductores durante el montaje. El plástico de cloruro de polivinilo sin colorantes es un material transparente de matiz amarillento. Con el plástico de cloruro de polivinilo se fabrican tubos aislantes flexibles y cinta aisladora adhesiva. Una particularidad característica de los materiales de cloruro de polivinilo es el hecho de que, una vez sacados de la llama, cesan de arder.

El poliformaldehído es un dieléctrico sólido termoplástico que se forma como resultado de la polimerización del formaldehído gaseoso. La estructura de las moléculas del poliformaldehído es lineal



El material representa un polvo de color blanco del que se obtienen artículos mediante el moldeo por inyección o extrusión.

Es particularidad característica del poliformaldehído el gran contenido de fase cristalina (75%), que garantiza al material características mecánicas elevadas y la temperatura de fusión (180°C) resaltante. Este material posee dureza elevada, gran solidez al frote y pequeño coeficiente de rozamiento. Estas propiedades permiten fabricar de poliformaldehído silenciosas transmisiones por engranajes y por tornillos sin fin y cojinetes.

* Los plásticos que se utilizan para la fabricación de las mangueras protectoras para cables (plásticos para mangueras) poseen características eléctricas mucho peores.

El intervalo de temperaturas de trabajo suficientemente amplio (desde -55 hasta 100°C), la resistencia a la humedad, la resistencia química y resistencia a las descargas por chispa, y asimismo las buenas características eléctricas garantizan una amplia esfera de utilización del poliformaldehído en calidad de material electroaislante. De éste se fabrican bases aislantes (placas), armazones de bobinas de perfil complicado y otras piezas. Los artículos de poliformaldehído pueden someterse a toda clase de maquinado: fresado, torneado, taladrado y otros.

Las características fundamentales del poliformaldehído son: densidad 1400 kg/m^3 ; $\sigma_t = (600\ldots 700) \cdot 10^5\text{ N/m}^2$; $\alpha = 80\ldots 90\text{ kJ/m}^2$; resistencia al calor (según Martens) 100°C ; resistencia al frío -50°C ; higroscopicidad 2% ; $\rho_v = 10^{12}\ldots 10^{13}\Omega \cdot \text{m}$; $\varepsilon = 3,0$; $\text{tg } \delta = (3\ldots 5) \cdot 10^{-3}$; $E_r = 25\text{ MV/m}$.

El vidrio orgánico (poliacrilato de metilo) es un material transparente, superpolímero y termoplástico, que se colorea fácilmente de diferentes tonos. Este material se fabrica en forma de hojas desde $0,8$ hasta 24 mm y más de espesor y tiene superficie desde $400 \times 500\text{ mm}^2$ hasta $1400 \times 1600\text{ mm}^2$, y también en forma de polvo. El vidrio orgánico es un material de estructura amorfa. Éste posee una transparencia óptica muy alta (deja pasar hasta 92% de rayos de la zona visible del espectro).

La sustancia líquida denominada metilmetacrilato sirve de material inicial para la obtención del vidrio orgánico. En dicha sustancia se incluye una pequeña cantidad ($0,1\%$) de peróxido de benzóilo y sustancias plastificantes (líquidos aceitosos). Estas últimas reducen la fragilidad del vidrio orgánico. La mezcla de ingredientes básicos se mixtura en un recipiente de níquel y, después de su calentamiento, se vierte en moldes calentados (hasta 120°C) fabricados de vidrio silíceo normal o de metal. Los moldes, después de enfriarlos, se desarman, y se cortan los bordes de las hojas y placas obtenidas de vidrio orgánico.

Para la obtención del vidrio orgánico en forma de polvo el proceso de polimerización del metilmetacrilato se efectúa en una disolución acuosa de sustancias alcalinas.

Las características fundamentales del vidrio orgánico son: densidad 1180 kg/m^3 ; $\sigma_t = (600...700) \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$; $a = 12...18 \text{ kJ/m}^2$; resistencia al calor (según Martens) $60...80 \text{ }^\circ\text{C}$; resistencia al frío $-(50...60) \text{ }^\circ\text{C}$; $\rho_v = 10^{10}...10^{11} \Omega \cdot \text{m}$; $\epsilon = 3,6$; $\text{tg } \delta = 6 \cdot 10^{-2}$; $E_r = 15...18 \text{ MV/m}$.

El vidrio orgánico es resistente a los ácidos y álcalis diluidos, y asimismo a la bencina y a los aceites minerales. Este vidrio se disuelve en los hidrocarburos aromáticos (benceno, tolueno, xileno), en los hidrocarburos clorados (clorobenceno, triclorobenceno y otros), en acetona y ciertos otros disolventes. En estado caliente ($115...135 \text{ }^\circ\text{C}$) el vidrio orgánico se moldea bien en moldes de acero o de madera para la fundición a presión. Mejores resultados se obtienen al moldear al vacío las piezas brutas calentadas.

El vidrio orgánico se elabora con todo tipo de maquinado (taladrado, fresado y otros). Para proteger el vidrio orgánico contra rasguños durante su maquinado el material se empapela previamente. Las piezas de vidrio orgánico se pegan fácilmente con cola de dicloroetano. Esta cola se obtiene mediante la disolución de las virutas de vidrio orgánico en dicloroetano (5 g de viruta en 100 g de dicloroetano). Las superficies a pegar deben estar bien ajustadas y lavadas con el disolvente (acetona y otros). Los sitios que se pegan se someten a apretujamiento durante 2...4 h. El vidrio orgánico y las piezas fabricadas de él se pueden también soldar en dispositivos especiales a la temperatura de 140 a $150 \text{ }^\circ\text{C}$ aplicando presión sobre las superficies a soldar.

El caprón * es un material sólido de color blanco o amarillo claro. Éste es también un material sintético que se obtiene como resultado de la polimerización del caprolactamo, sustancia en polvo cuya temperatura de fusión es de $70 \text{ }^\circ\text{C}$. El polímero obtenido, el caprón, se extruye a través de un orificio en el fondo de la autoclave en forma de cinta estrecha. Esta última va a parar a un baño de agua corriente, donde se lava de las sustan-

* El caprón pertenece al grupo de materiales sintéticos llamados poliamidas. Algunos de ellos se obtienen como resultado de la reacción de policondensación (véase § 15).

cias de bajo peso molecular, que empeoran las propiedades del caprón. La cinta de caprón, lavada y enfriada en el agua, entra en la máquina picadora y se corta en pedacitos: migajas de 10 mm de longitud y de 2 a 3 mm de espesor. Las migajas obtenidas se someten a un lavado complementario con agua templada, y después se secan. *Las migajas de caprón secas se almacenan en sacos de goma, pues son capaces de absorber la humedad del aire.*

El caprón, al igual que el polietileno, contiene fases cristalina y amorfa, que se combinan entre sí, por lo que en el caprón se observa una temperatura de fusión bien expresada (215 °C). Éste es muy resistente al enmohecimiento, pero no es resistente a los influjos atmosféricos. Para elevar la resistencia del caprón a los influjos atmosféricos en éste se introducen estabilizadores (de 0,3 a 0,5 %).

Las características fundamentales del caprón son: densidad 1140 kg/m³; $\sigma_t = (500...700) \cdot 10^5$ N/m²; $\alpha = 100...150$ kJ/m²; resistencia al calor (según Martens) 50...60 °C; higroscopicidad 3% en masa; $\rho_v = 10^{11}...10^{12}$ $\Omega \cdot m$; $\epsilon = 4,0$; $\text{tg } \delta = 0,04$; $E_r = 18...20$ MV/m.

Igual que en otros materiales poliméricos en el caprón se observa una deformación lenta (fluencia en frío) bajo la acción de una carga permanente. Si la deformación se encuentra en los límites de hasta 3% entonces, una vez quitada la carga, desaparece.

En el aislamiento eléctrico encuentra empleo la fibra de caprón, que se obtiene durante el estirado a través de las toberas de hilado (orificios redondos pequeños con diámetro de 0,1 mm y menos) de la resina de caprón ablandada. La fibra de caprón posee una gran resistencia mecánica y elevada resistencia a la abrasión. Se utiliza como aislamiento de los conductores de bobinado y otros tipos de conductores de conexión, y asimismo en calidad de urdidumbre de los tejidos electroaislantes barnizados.

El caprón ha obtenido un empleo considerable en la producción de piezas para construcción y montaje, que se distinguen por su pequeña masa.

§ 15. Dieléctricos sólidos policondensados

La policondensación es el proceso de unión de las moléculas de varias sustancias iniciales (monoméricas) en moléculas grandes de sustancia superpolímera. Como regla, la reacción de policondensación transcurre en varias etapas.

Los dieléctricos obtenidos como resultado de la reacción de policondensación poseen propiedades electroaislantes algo reducidas en comparación con los dieléctricos obtenidos como resultado de la polimerización. Las causas principales de esto es la existencia en los dieléctricos policondensados de sustancias secundarias: agua, ácidos que, al descomponerse en iones, aumentan la electroconductibilidad del material. Entre los dieléctricos policondensados en la electrotécnica han obtenido una mayor utilización las resinas de resol (termosólida en estado inicial), novolacas, poliésteres y epoxídicas.

Las resinas de resol son sustancias termoendurecibles que en su fase final no reblandecen al ser calentadas. La conversión al estado infusible e insoluble en las resinas de resol se realiza en tres etapas. La resina recién obtenida se encuentra en el estado inicial A (resol). Ésta reblandece durante el calentamiento y se disuelve en los disolventes. Durante el calentamiento ulterior la resina de resol pasa al estado B, en el que todavía puede reblandecer (a 95 °C), pero ya no se disuelve en los solventes. Con el sucesivo calentamiento la resina pasa al estado final C. En esta fase la resina de resol se compone de moléculas tridimensionales grandes y ya no es capaz de fundirse y disolverse. Esta propiedad de las resinas de resol se utiliza en la producción de plásticos termoendurecibles (cartón baquelizado, textolita y otros).

Entre las resinas de resol la resina de baquelita tiene mayor empleo en la electrotécnica. Esta resina se forma como resultado de la reacción de policondensación, que transcurre entre el fenol cristalino ($C_6H_5 - OH$) y la formalina (disolución al 40% de gas formaldehído en agua) en presencia del catalizador alcalino, hidróxido de bario $Ba(OH)_2$ o hidróxido de amonio NH_4OH en forma de disolución acuosa al 25 %. El formaldehído se toma en exceso,

Para la obtención de la resina de baquelita en el reactor se carga una determinada cantidad de componentes (fenol, formalina y el catalizador), donde se mezclan con un agitador rotativo. Luego la mezcla se calienta hasta 95 °C. A esta temperatura comienza la reacción de policondensación, como resultado de la cual en la parte inferior del reactor se forma una masa espesa parecida al sirope de color castaño. Esta masa es la resina de baquelita en el estado inicial A. Después del secado al vacío (a 60 °C) la resina se vierte en moldes metálicos.

La resina de baquelita enfriada (hasta la temperatura ambiente) representa una sustancia sólida frágil de color castaño. Ésta se emplea en calidad de sustancia aglutinante en los plásticos, y asimismo para la obtención de barnices de baquelita. Con el fin de obtener barniz de baquelita alcohólico el alcohol etílico se introduce en una caldera de cocción para disolver la resina secada en la fase A. Generalmente se obtiene barniz con un contenido de 50 a 60 % de resina de baquelita.

Para lograr economía de alcohol etílico se utilizan ampliamente resinas líquidas de baquelita hidroemulsivas, que contienen de 15 a 20 % de agua. Con barnices alcohólicos y resinas líquidas se impregnan las urdimbres fibrosas (papel, tejidos), que se utilizan para la producción de materiales electroaislantes foliados: cartón baquelizado, textolita, laminado de tela de fibra de vidrio y otros.

Si en lugar de fenol cristalino se toma cresol (sustancia líquida) y se efectúa la policondensación entre el cresol y el formaldehído entonces se obtendrá la resina cresol-formaldehído. Esta resina también pertenece a las resinas de resol en estado inicial y posee propiedades electroaislantes más elevadas.

Todas las resinas de resol son dieléctricos polares, por lo que su permitividad $\epsilon = 5...6^*$. En su estado final C las resinas de resol poseen resistencia a los aceites minerales y al agua, pero no son resistentes a las chispas eléctricas. Bajo la acción de las descargas eléctricas la superficie de las resinas de resol se enriquecen de carbono con facilidad, como resultado de lo cual se originan bandas carburadas conductoras. Debido a esto las piezas de

plástico fabricadas a base de resinas de resol no se recomiendan emplear allí donde es posible la formación de chispas eléctricas fuertes.

Las resinas fenólicas de dos fases (novolacas)*, al igual que las de resol, se obtienen como resultado de la reacción de policondensación entre el fenol y el formaldehído, pero en la escasez de este último. Con esto se emplean un catalizador ácido: el ácido clorhídrico.

La resina novolaca obtenida es una masa espesa de color castaño claro, que en estado caliente se vierte en los moldes. Una vez enfriada la resina novolaca es una sustancia sólida frágil que se disuelve en el alcohol etílico y en la acetona. Las propiedades electroaislantes de las resinas novolacas son inferiores a las de resol.

Las resinas novolacas son sustancias termoplásticas que conservan su fusibilidad y solubilidad durante su prolongado almacenamiento e incluso durante su calentamiento hasta 200 °C. Las resinas novolacas pueden transmutar al estado infusible e insoluble durante su interacción (en estado caliente) con la urotropina $(CH_2)_6N_4$. Esto se aprovecha para obtener plásticos de molde rápido a base de las resinas novolacas. Para ello, en la resina novolaca pulverulenta, se introduce de 15 a 20 % de urotropina (polvo de color blanco). Con la mezcla obtenida se prensan, en moldes calientes de acero, piezas de plástico para los aparatos eléctricos de baja tensión (soportes y tapas de interruptores, cartuchos), así como también piezas constructivas (botones, palancas y otras).

Las resinas gliceroftálicas (gliptálicas)** pertenecen al grupo de resinas polietéreas que se obtienen mediante la policondensación de los alcoholes poliatómicos (glicol, glicerina y otros) y de los ácidos orgánicos (ftálico, maleico y otros).

Las resinas gliceroftálicas se obtienen como resultado de la reacción de policondensación de la glicerina y del anhídrido ftálico en el exceso de este último.

* Las resinas de resol y novolacas son materiales electroaislantes semiacabados, por lo que no se exponen sus características.

** Las resinas gliceroftálicas son productos semiacabados de los materiales electroaislantes, por lo que no se exponen sus características.

Para obtener suficiente flexibilidad las resinas gliceroftálicas se modifican, es decir, en el proceso de policondensación se introducen en ellas ácidos grasos y aceites vegetales, por ejemplo, de ricino. Son singularidades distintivas de las resinas gliceroftálicas su elevada capacidad adhesiva con buenas características eléctricas, su resistencia a las descargas superficiales y alta resistencia al calor hasta 150 °C (clase B).

En la electrotécnica las resinas gliceroftálicas se emplean como urdimbre para los barnices de cola, para impregnación y de acabado, cuyas películas (después de secarlas) resultan ser resistentes al aceite mineral caliente.

Los barnices gliptálicos de cola encuentran amplio empleo para la adhesión de la mica en la producción de aislamiento duro y flexible de mica (micanita, cinta de mica).

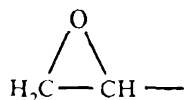
El lavsán (fibra de poliéster) es un dieléctrico superpolímero transparente de estructura cristalina o amorfa. Igual que las resinas gliptálicas éste pertenece a los poliésteres. El lavsán de estructura cristalina se obtiene como resultado de la reacción de policondensación del ácido tereftálico y del etilenoglicol. Las películas transparentes de lavsán de 30 a 100 μm de espesor encuentran empleo en calidad de aislamiento de ranura en las máquinas eléctricas. Frecuentemente la película de lavsán se pega sobre el cartón electrotécnico o sobre el tejido de lana de vidrio y, en semejante combinación, se utiliza como aislamiento de ranura en las máquinas eléctricas. Las películas de lavsán son resistentes a los disolventes, que se contienen en los barnices, y asimismo al enmohecimiento y a la humedad, por lo que pueden emplearse en las máquinas eléctricas y en los aparatos de ejecución resistente al clima tropical. Las películas de lavsán pueden funcionar durante largo tiempo a temperaturas que no excedan 120 °C (clase E de resistencia al calor).

Teniendo una resistencia eléctrica bastante grande las películas de lavsán, sin embargo, no son resistentes al efecto corona. Por esto, la esfera de su empleo queda limitada por los equipos eléctricos de baja tensión. Al encontrarse durante prolongado tiempo en el aceite para transformadores a una temperatura de 110 a 120 °C las películas adquieren fragilidad.

Las características fundamentales del lavsán (película) son: densidad 1400 kg/m^3 ; resistencia al calor $70 \dots 75^\circ\text{C}$; resistencia al frío -60°C ; higroscopicidad, $1,5 \%$ en masa; $\sigma_t = (1800 \dots 2000) \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$; $\rho_v = 10^{12} \dots 10^{13} \Omega \cdot \text{m}$; $\epsilon = 3,5$; $\text{tg } \delta = (2 \dots 6) \cdot 10^{-3}$; $E_r = 130 \dots 150 \text{ MV/m}$.

Las resinas epoxídicas son líquidos consistentes o sustancias sólidas de color amarillo o castaño claro. Las resinas epoxídicas líquidas son sustancias de bajo peso molecular, pero cuando la masa molecular es grande éstas son sustancias sólidas.

Las resinas epoxídicas se obtienen como resultado de la reacción de policondensación de la glicerina clorada con la resorcina o el difenilpropano. El proceso de formación de la resina transcurre en un medio alcalino. Las moléculas de las resinas epoxídicas contienen los denominados grupos epoxídicos



de donde proviene el nombre de estas resinas.

Las resinas epoxídicas encuentran amplio empleo en la electrotécnica como urdimbres de los compuestos electroaislantes selladores de juntas, y asimismo en calidad de barnices de aparejo y colas. Es una cualidad de los compuestos epoxídicos su pequeña contracción volumétrica (de $0,6$ a $1,0 \%$) durante su solidificación. Además, las resinas epoxídicas solidificadas poseen gran resistencia mecánica y resistencia al agua.

En calidad de endurecedores se utilizan los anhídridos de los ácidos maleico y ftálico y otras sustancias (piridina y otras). Según sea la composición del endurecedor que se utiliza el proceso de solidificación de la resina epoxídica líquida puede transcurrir durante el calentamiento hasta $100 \dots 160^\circ\text{C}$ o a la temperatura ambiente.

Las características fundamentales de las resinas epoxídicas en estado solidificado son: densidad 1200 kg/m^3 ; $\sigma_t = (300 \dots 600) \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$; $a = 8 \dots 18 \text{ kJ/m}^2$; higroscopicidad $0,05 \%$ en masa; resistencia al calor (según Martens) $100 \dots 110^\circ\text{C}$; $\rho_v = 10^{12} \dots 10^{13} \Omega \cdot \text{m}$; $\epsilon = 3,8$; $\text{tg } \delta = (2 \dots 5) \cdot 10^{-3}$; $E_r = 20 \dots 25 \text{ MV/m}$.

§ 16. Dieléctricos superpolímeros resistentes al calor

Los dieléctricos orgánicos superpolímeros antes estudiados pueden emplearse durante largo tiempo a temperaturas de hasta 90...105 °C y, solamente algunos de ellos, por ejemplo, las resinas gliptálicas, a hasta 130 °C. Así pues, la inmensa mayoría de los dieléctricos orgánicos pueden funcionar durante largo tiempo a temperaturas que no excedan de 90 a 105 °C (clases de resistencia al calor Y y A). Al sobrepasar las temperaturas indicadas los dieléctricos orgánicos, como resultado del envejecimiento térmico, se destruyen rápidamente.

Los materiales electroaislantes de origen inorgánico, por ejemplo, los materiales electrocerámicos (porcelana, esteatita) poseen gran resistencia al calor, pero de ellos no se pueden fabricar aislamientos de tipo elástico. Como demuestran las investigaciones la causa fundamental de la baja resistencia al calor de los dieléctricos orgánicos superpolímeros es la relativamente pequeña energía del enlace químico entre los átomos de carbono, que forman la base de las moléculas de los dieléctricos orgánicos. Así, por ejemplo, la energía del enlace químico entre los átomos carbono — carbono ($C - C$) es igual a 58,6 kcal/mol.

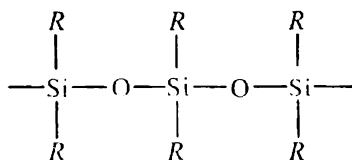
Al calentar los dieléctricos en el proceso de su aprovechamiento hasta la temperatura con la que la energía calorífica sea superior a la del enlace químico éstos sufren un envejecimiento térmico, es decir, se destruyen. Era necesario encontrar nuevas variedades de dieléctricos que constaran de moléculas con mayor energía de enlace.

Como resultado de numerosas investigaciones se elaboraron nuevos dieléctricos superpolímeros de silicona *.

La base de las moléculas de estos dieléctricos está compuesta por la agrupación silícea de los átomos $-Si-O-Si-$, cuya energía de enlace es igual a 89,6 kcal/mol. Por consiguiente los dieléctricos de silicona tienen una resistencia al calor mayor que la de los dieléctricos orgánicos antes estudiados.

* El académico K. A. Andriánov y sus colaboradores realizaron grandes trabajos de investigación y elaboración de dieléctricos superpolímeros de silicona.

El nombre de «dieléctricos de silicona» está determinado por el hecho de que en la composición de sus moléculas, además de los átomos de silicio y de oxígeno, entran los restos de distintos compuestos orgánicos: CH_3 , C_2H_5 , C_6H_5 y otros. Estos restos orgánicos se denominan *radicales orgánicos* y se designan con la letra *R*. En términos generales la molécula de los dieléctricos superpolímeros de silicona puede ser representada así



En dependencia de los radicales orgánicos incorporado y del número de estos últimos que coexisten en un átomo de silicio pueden obtenerse dieléctricos líquidos, parecidos al caucho y sólidos. Estos son sustancias o incoloras o de un colorido amarillo pálido hasta castaño. La elevada resistencia al calor y al frío es una particularidad distintiva de todos los dieléctricos de silicona. Los materiales electroaislantes de silicona (plásticos, gomas, barnices y otros) pueden trabajar durante largo tiempo en el intervalo de temperaturas de -60 a 180°C , y algunos de ellos hasta 220°C . Además, los dieléctricos de silicona se distinguen por su alta resistencia al agua, a los aceites minerales, y asimismo a las descargas eléctricas por chispas. Estos dieléctricos no se disuelven en los aceites minerales y no se carburan con las chispas eléctricas.

Las características eléctricas de los dieléctricos de silicona se encuentran a alto nivel y varían poco durante su calentamiento (fig. 16) y durante la acción del agua. Sus características eléctricas son las siguientes: $\rho_v = 10^{14} \dots 10^{15} \Omega \cdot \text{m}$; $\epsilon = 2,6 \dots 3,5$; $\text{tg} \delta = 0,003 \dots 0,005$; $E_r = 30 \dots 55 \text{ MV/m}$ (en las películas de barniz $E_r = 80 \dots 120 \text{ MV/m}$).

Los materiales de silicona son dieléctricos de débil polaridad.

Plástico fluorocarbúrico-4. La obtención del material sólido superpolímero, del plástico fluorocarbúrico-4,

fue un gran logro en la rama de elaboración de dieléctricos resistentes al calor. Este es un material incombustible, graso al tacto, de color blanco. Se obtiene como resultado de la polimerización del gas licuado de tetrafluoroetileno $F_2C = CF_2$. El polímero que se origina es un polvo friable del que, mediante el prensado (en moldes de acero para la fundición a presión), se obtienen diversos artículos.

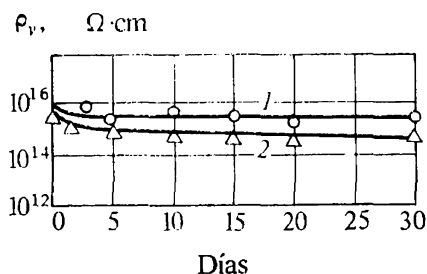


Fig. 16.

Dependencia entre la resistividad de volumen de las películas de barniz silicónico y el tiempo de permanencia a la temperatura de 180 °C y tiempo de curación en el agua:

1, permanencia a 180 °C; 2, curación en el agua

Para que se forme un material compacto, monolítico, los artículos prensados a la temperatura ambiente se someten a sinterización en hornos. Al enfriar rápidamente las piezas brutas y los artículos, calentados hasta 370 °C, el material tiene una estructura amorfa, y al enfriarlo lentamente adquiere una estructura microcristalina. Esta última garantiza al material una buena facilidad de elaboración y estabilidad de sus propiedades.

La particularidad fundamental del plástico fluorocarbúrico-4 es su extraordinariamente alta resistencia al calor (250 °C) y al frío (— 269 °C). Durante el calentamiento hasta 327 °C (punto de transición) su estructura cristalina pasa a la amorfa y el material adquiere transparencia. Al calentarlo hasta la temperatura de 415 °C el material no se ablanda, pero comienza su descomposición térmica con el desprendimiento del flúor, que es una sustancia tóxica.

La causa principal de la elevadísima resistencia al calor del plástico fluorocarbúrico-4 es la gran magnitud de la

energía del enlace químico entre los átomos de carbono y flúor (107 kcal/mol) en su molécula. El plástico fluorocarbúrico-4 se distingue también por su exclusivamente alta estabilidad química: no se disuelve en ningún disolvente, tanto a la temperatura ambiente como durante el calentamiento, y sobre él no actúa ninguno de los ácidos concentrados y álcalis. La higroscopicidad del plástico fluorocarbúrico-4 es nula, y éste no se moja en el agua.

Las características fundamentales del plástico fluorocarbúrico-4 son: densidad 2100 kg/m^3 ; $\sigma_t = (140...250) \times 10^5 \text{ N/m}^2$; $a = 100...130 \text{ kJ/m}^2$; $\rho_v = 10^{15}...10^{17} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$; $\epsilon = 2,0$; $\text{tg} \delta = (2...4) \cdot 10^{-4}$; $E_r = 30 \text{ MV/m}$ (en las películas $E_r = 100...180 \text{ MV/m}$).

El plástico fluorocarbúrico-4 es un dieléctrico no polar, por eso sus características eléctricas son estables en una amplia gama de frecuencias. En la electrotécnica se emplean películas finas (de 10 a 200 μm).

Un defecto del plástico fluorocarbúrico-4 es su fluidez a la temperatura ambiente, es decir, comienza a deformarse con tensiones en el material de $130 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ y más. Por lo tanto, no se pueden permitir cargas mecánicas sobre las piezas de plástico fluorocarbúrico-4, que crean en el material tensiones mayores que $130 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$.

La industria de la URSS, a la par del plástico fluorocarbúrico-4, produce variedades de este dieléctrico; el plástico fluorocarbúrico-4D, el plástico fluorocarbúrico-40 y otros. Éstos se diferencian del plástico fluorocarbúrico-4 por su forma, dimensiones de las partículas de la masa pulverulenta y por tener posibilidades más vastas de transformar estos tipos de plásticos fluorocarbúricos en artículos. Los valores de las características mecánicas y eléctricas del plástico fluorocarbúrico-4D y del plástico fluorocarbúrico-40 se diferencian muy poco de las correspondientes características del plástico fluorocarbúrico-4.

Los poliimidos son dieléctricos orgánicos nuevos que pueden utilizarse durante largo tiempo a temperaturas de 200 a 220 °C. Los artículos electroaislantes poliimídicos (plásticos) pueden emplearse a temperaturas de hasta — 155 °C y más bajas, y las películas poliimídicas electroaisladoras pueden resistir durante largo tiempo temperaturas bajas (— 190 °C) sin destruirse. Los poliimidos son

dieléctricos químicamente estables. Estos no se disuelven en la mayoría de los disolventes orgánicos; los ácidos diluidos, los aceites minerales y el agua no influyen sobre ellos. La destrucción de los poliimidos es provocada por los ácidos concentrados, álcalis y el vapor de agua recalentado.

Los poliimidos son dieléctricos obtenidos como resultado de la reacción de policondensación del anhídrido piro-metílico y ciertos compuestos aromáticos: las diaminas. A base de los poliimidos se fabrican esmaltes-barnices para el esmaltado de los hilos de bobinado. Estos hilos pueden trabajar durante largo tiempo a temperaturas de hasta 220 °C.

De los poliimidos se obtienen películas elásticas semi-transparentes electroaisladoras de colorido amarillo claro o castaño. Las películas poliimídicas se fabrican con espesor desde 5 hasta 100 μm y más.

Las características fundamentales de las películas son: $\sigma_t = (1000...1200) \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$; $\rho_v = 10^{15} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$; $E_r = 100...150 \text{ MV/m}$. La higroscopicidad es relativamente grande en las películas y, por término medio, es del 1 % en 24 horas de estancia de las películas en vapores de agua a 20 °C, por lo que es necesario impregnar con barnices resistentes al calor y al agua los hilos de bobinado con aislamiento poliimídico pelicular.

La película poliimídica que se aplica a los hilos se pega a éstos con ayuda de barniz poliimídico de aparejo.

Las películas poliimídicas se emplean también en calidad de aislamiento de ranura en las máquinas eléctricas de fabricación resistente al calor.

A base de los poliimidos termoplásticos se fabrican diferentes artículos plásticos con destino electroaislador y constructor. Para ello se emplean tanto los poliimidos puros como los rellenos con fibra de vidrio y otras cargas resistentes al calor. Los artículos de poliimidos se fabrican por colada y prensado a temperaturas de 350 a 400 °C.

Debido a la gran fluidez de los poliimidos, pequeña contracción volumétrica y estabilidad de las propiedades durante su transformación son particularidades distintivas de los plásticos poliimídicos la facilidad de su transformación en piezas.

Los plásticos poliimídicos poseen alta resistencia al calor (de 220 a 250 °C), buenas características eléctricas y mecánicas. Así, la resiliencia de los poliimidos no rellenos es $a = 35...50 \text{ kJ/m}^2$,¹ y la de los rellenos con fibra de vidrio $a = 110...130 \text{ kJ/m}^2$.

La higroscopicidad de los artículos poliimídicos de plástico no supera el 0.8 % después de hervirlos en agua durante 24 h. Todos los plásticos a base de poliimidos poseen una resistencia de radiación muy alta.

§ 17. Gomas electroaislantes

La elasticidad grande de todas las gomas, es decir, la propiedad de éstas de alargarse considerablemente durante la tracción sin alargamiento permanente una vez retirada la carga tractora, es una cualidad característica de ellas. Se debe señalar también la elevada resistencia al agua y estanquidad a los gases de las gomas y sus buenas características electroaislantes. El componente fundamental de todas las gomas es el caucho natural (CN) o el sintético (CS). Éstos son polímeros que poseen dobles enlaces químicos, propensos a la unión de las moléculas del caucho entre sí durante el proceso de vulcanización. Como resultado de ello se obtiene un material de alta elasticidad, que posee la resistencia al agua y estanquidad a los gases.

Para la realización del proceso de vulcanización en la mezcla básica de goma se introduce azufre (de 1 a 3 % en masa) o thiuram, y para la aceleración de dicho proceso en la mezcla también se introducen acelerantes. Éstos son sustancias orgánicas compuestas, por ejemplo, captax.

Las cargas son las componentes correspondientes de las mezclas de goma. Los blancos de zinc y el negro carbonoso pertenecen a las cargas activas, que elevan la resistencia mecánica de las gomas. Entre las cargas inactivas tienen un mayor empleo la creta, el talco y el caolín, que se introducen con el fin del abaratamiento de las gomas.

En las mezclas básicas de goma se introducen además reblandecedores (ácido esteárico, parafina y otros) y anti-envejecidores (neozono). Los reblandecedores mejoran la plasticidad de las gomas crudas, hecho que facilita la

superposición del aislamiento de goma en las almas de los conductores, y asimismo reducen la temperatura de su vulcanización.

Los antienviejecedores elevan la resistencia del aislamiento de goma a la oxidación, al envejecimiento térmico y a la luz. Es sabido que bajo la acción del calentamiento, de la luz y de los oxidantes (oxígeno, ozono) el aislamiento de goma se hace frágil y se agrieta.

A veces en las composiciones originales de goma se introducen colorantes: sanguínea, blancos de zinc y otros. Los colorantes reducen las propiedades aislantes de las gomas.

Más abajo se expone la composición de una mezcla básica (goma cruda).

En la masa al 100 % de caucho se introduce la siguiente cantidad de componentes: cargas, de 20 a 90 %; vulcanizadores, de 1 a 3 %; acelerantes, de 1 a 2 %; antienviejecedores, de 0,5 a 3 %; plastificantes, de 2 a 50 %; colorantes, de 0,5 a 3,0%. El mezclado de todas las componentes se efectúa en mezcladoras especiales a la temperatura de 100 a 140 °C.

La goma cruda posee plasticidad y se aplica y envuelve con facilidad al hilo desnudo del conductor, formando su aislamiento principal. El proceso de aplicación de la goma cruda al hilo del conductor se realiza en máquinas extruidoras especiales *. De este mismo modo se aplican al cable las envolturas protectoras de goma. Para este fin se emplean gomas para mangueras de propiedades aislantes reducidas.

Para que la goma cruda posea elasticidad, suficiente resistencia mecánica y elevado nivel de las características eléctricas ésta se somete a la vulcanización. La vulcanización es el proceso de tratamiento térmico de la capa de goma cruda en los conductores a la temperatura de 140 a 200 °C, en dependencia de la composición de la goma cruda. Así, para las gomas cuya base es el caucho orgánico de silicona la temperatura de vulcanización es de 180 a 200 °C, y el proceso de vulcanización se realiza en dos

* También se emplean otros procedimientos de aplicación del aislamiento de goma a los conductores.

etapas. Para la mayoría de otras gomas la temperatura de vulcanización es de 140 a 160 °C.

Para efectuar la vulcanización los conductores, cubiertos de una capa de goma cruda, se enrollan en tambores metálicos que se cargan en las calderas de vulcanización. En la camisa de vapor de la caldera y en su espacio interior se deja entrar vapor de agua saturado a la presión de 0,5 a 2,0 MPa, o aire caliente. El proceso de vulcanización dura de 30 a 70 minutos y más.

En el proceso de vulcanización el azufre o el thiuram entran en reacción química con las moléculas de caucho, uniendo unas a otras con puentes transversales. Esto comunica a las gomas una mayor resistencia mecánica y mejores propiedades aislantes en comparación con los cauchos. La parte de azufre que no reaccionó con las moléculas de caucho, permaneciendo libre, puede desprenderse sobre la superficie de la goma y, al contactar con la superficie del hilo de cobre, entra en reacción con él, originando el sulfuro cúprico (CuS). Este último ejerce influencia nociva sobre la goma. Para evitarlo el aislamiento de goma se aplica al alambre de cobre estañado. Sobre el alambre de aluminio el aislamiento de goma puede ser aplicado directamente.

Como resultado de la vulcanización efectuada se obtienen gomas electroaisladoras cuyas características fundamentales son: $\sigma_t = 3,5 \dots 4,5$ MPa; $\epsilon_t = 250 \dots 300$ %; $\rho_v = 10^{11} \dots 10^{12} \Omega \cdot m$; $\epsilon = 3,5 \dots 4,5$; $\operatorname{tg} \delta = 0,008 \dots 0,01$; $E_r = 20 \dots 45$ MV/m. Las gomas que se emplean para el aislamiento de las almas de los cables para tensiones superiores de 1000 V poseen valores elevados de las características eléctricas y mecánicas. En las gomas para mangueras el nivel de las características eléctricas es inferior, y el de las características mecánicas superior en comparación con las gomas electroaisladoras. Así, el esfuerzo destructor durante la tracción en las gomas para mangueras es $\sigma_t = 5 \dots 11$ MPa.

Ciertas composiciones de las gomas para mangueras son resistentes al aceite y a la bencina y no propagan la combustión.

Las temperaturas de trabajo del aislamiento de goma a base de cauchos natural y sintético se encuentran en los lí-

mites desde $-(50...70)$ hasta $+(65...85)$ °C. Son excepción las gomas a base de caucho orgánico de silicona, en las que el intervalo de las temperaturas de trabajo es muy amplio: desde -100 hasta $+200$ °C.

§ 18. Barnices y esmaltes

Los barnices son disoluciones coloidales * de algunas sustancias que forman película en disolventes orgánicos elegidos especialmente.

Pertenecen a las sustancias formadoras de película las resinas (naturales y sintéticas), los aceites vegetales secantes, ésteres celulósicos ** y otras. En calidad de disolventes de las sustancias que forman película se emplean los líquidos de fácil evaporación (volátiles): benceno, tolueno, xileno, alcoholes, acetona, aguarrás y otros.

Para la dilución de los barnices espesor en éstos se introducen diluentes, que se diferencian de los disolventes por ser menos volátiles. En calidad de diluentes se utiliza la gasolina, la nafta de barnices, el aguarrás y otros líquidos.

En la composición del barniz pueden entrar también plastificantes y secantes.

Los plastificantes son sustancias que comunican elasticidad a la película de barniz; a ellos pertenecen el aceite de ricino, los ácidos grasos del aceite de linaza y otros.

Los secantes son sustancias líquidas o sólidas que se introducen en ciertos barnices para acelerar su secamiento.

Al secar la capa de barniz aplicada a cualquier superficie los disolventes orgánicos contenidos en él se volatizan (evaporan) y las sustancias formadoras de película, como resultado de los procesos de polimerización, forman una película dura de barniz. Esta película puede ser flexible (elástica) o inflexible y frágil, en dependencia de las pro-

* Las disoluciones coloidales se diferencian de las moléculas (verdaderas) por estar compuestas de partículas pequeñas que, por sus dimensiones, exceden a la molécula.

** Los ésteres celulósicos son sustancias amorfas que se obtienen como resultado de la elaboración química de la celulosa vegetal.

piedades de las sustancias formadoras de película que componen el soporte de barniz.

Según su destino los barnices electroaislantes se dividen en barnices para impregnación, de acabado y de aparejo.

Los barnices para impregnación se utilizan para impregnar los arrollamientos en las máquinas y aparatos eléctricos con el fin de cementar (ensamblar) las espiras del arrollamiento entre sí, y también para eliminar la porosidad en el aislamiento de los arrollamientos. El barniz para impregnar, penetrando en los poros del aislamiento de los arrollamientos, desaloja el aire de allí y, después de su solidificación, hace el arrollamiento ser resistente a la humedad. Con ello aumenta la resistencia eléctrica del aislamiento del arrollamiento y su coeficiente de conductibilidad térmica. Una de las características fundamentales de los barnices para impregnación es su *capacidad impregnante*. Cuanto menor es la viscosidad del barniz tanto mayor es su capacidad impregnante.

Los barnices de acabado se emplean para la creación en la superficie de los arrollamientos ya impregnados recubrimientos de barniz resistentes a la humedad o a los aceites. A los barnices de acabado pertenecen también las lacas de esmaltar, que se utilizan para la esmaltadura de los conductores de bobinado, y asimismo los barnices que se emplean para el aislamiento de las chapas de acero para transformadores y otras piezas.

Los barnices de aparejo se utilizan para pegar distintos materiales electroaislantes: láminas de mica (en la producción de aislamiento estratiforme de mica), cerámica, plásticos y otros. La exigencia principal que se presenta a los barnices de aparejo consiste en que estos barnices posean buena pegajosidad (adhesividad) y que formen una costura resistente.

Todos los barnices, según el procedimiento de secamiento, se dividen en dos grupos: barnices de secado al aire (frío) y barnices de secado en estufa (caliente).

En los barnices de secado al aire la solidificación de la película transcurre a la temperatura ambiente. A éstos pertenecen los barnices de goma laca, etereocelulósicos y algunos otros.

En los barnices de estufa la solidificación de la película solamente es posible a temperaturas considerablemente mayores que la ambiente (desde 100 °C y más). En los barnices de estufa se emplean sustancias termoendurecibles que forman película (resinas gliptálicas, de resol y otras) y cuya solidificación está determinada por los procesos de polimerización, que requieren temperaturas elevadas. Los barnices de estufa, como regla, poseen características, mecánicas y eléctricas más elevadas.

Los esmaltes electroaislantes son barnices en los que se introducen sustancias finamente trituradas: los pigmentos.

En calidad de pigmentos se emplean sustancias inorgánicas, fundamentalmente óxidos de metales (óxido de zinc, sanguina, litopón * y otros) y sus mezclas. Las sustancias pigmentarias, introducidas en el barniz, se trituran minuciosamente en los molinillos para pinturas hasta obtener una masa homogénea. En el proceso de secamiento de los esmaltes los pigmentos entran en reacción química con el soporte del barniz, formando un recubrimiento denso de elevada dureza.

Los esmaltes electroaislantes son materiales de cobertura. Con ellos se revisten las partes frontales de los arrollamientos de las máquinas y aparatos eléctricos con el fin de protegerlos contra los aceites lubricantes, humedad y otras influencias.

La base de muchos esmaltes electroaislantes son los barnices oleogliptálicos, que se caracterizan por su alta capacidad pegadiza y elevada resistencia al calentamiento. Sobre la base de los barnices oleogliptálicos se producen esmaltes de diversas marcas: СПД (SPD), esmalte de secado en caliente (105 °C), los recubrimientos de este esmalte tienen color gris y poseen resistencia a los aceites minerales y a las chispas eléctricas; СВД (SVD), esmalte de secado frío, que forma cubiertas de color gris, resistentes a los aceites minerales; КВД (KVD), esmalte de secado frío, que forma cubiertas de color rojo-castaño, resistentes a los arcos eléctricos.

* El litopón es una mezcla de sulfuro de zinc con sulfito de bario, que comunica al esmalte color blanco.

Tabla 5. Características fundamentales de los barnices electroaislantes

Clasificación del barniz según su base	Marca (número del barniz)	Tiempo de secado, h (a temperatura, °C)	Termoelasticidad* de las películas, h (temperatura de ensayo, °C)	Características eléctricas a 20 °C		Campo de aplicación
				ρ , $\Omega \cdot m$	E_r , MV/m	
Al óleo	452	1 (405)	1...3 (405)	$10^{11} \dots 10^{12}$	50...60	Barniz para impregnación y de acabado. Se utiliza durante las reparaciones de las máquinas eléctricas
Oleobituminoso	BT (BT)-987	5...6 (405)	8...40 (450)	$10^{12} \dots 10^{13}$	55...60	Barniz para impregnación. Se utiliza para impregnar los arrollamientos de las máquinas eléctricas y aparatos con aislamiento de las clases A y E
	BT (BT)-988	3 (405)	5...6 (450)	$10^{12} \dots 10^{13}$	55...60	Idem
De resina glicéptica	ГФ(ГФ)-95	2 (405)	48...50 (450)	$10^{12} \dots 10^{13}$	70...75	Barniz para impregnación y de acabado para los arrollamientos que funcionan en aceite

Tabla 5. (continuación)

Clasificación del barniz según su base	Marca (número del barniz)	Tiempo de secado, h (a temperatura, °C)	Termoelasticidad * de las películas, h (temperatura de ensayo, °C)	Características eléctricas a 20 °C		Campo de aplicación
				$\rho \Omega \cdot m$	E_r , MV/m	
Silicónico	MJI (ML)-2	1...2 (105)	48...50 (150)	$10^{12} \dots 10^{13}$	65...70	Barniz para impregnación y de acabado de elevada capacidad cementadora
	KO-964	1...2 (200)	200...250 (200)	$10^{13} \dots 10^{14}$	75...80	Barniz para impregnar de elevada resistencia al calor (hasta 200 °C) y al agua
	KO-923	25-30 min (200)	100...120 (200)	$10^{12} \dots 10^{13}$	60...65	Idem

* La termoelasticidad es el tiempo de ensayo de las películas de barniz o de esmalte (aplicadas a una hoja de cobre) a una temperatura dada, transcurrido el cual aparecen indicios de envejecimiento (fisuras).

Tabla 6. Características fundamentales de los esmaltes electroaislantes

Marca del esmalte*	Base de esmalte (barniz)	Tiempo de secado y temperatura, °C	Termoelasticidad de las películas, h, temperatura de ensayo, °C	Características eléctricas a 20 °C		Campo de aplicación
				$\rho_v, \Omega \cdot m$	$E_r, MV/m$	
ГФ (GF)-92-ГС (GS) (СМД) (SMD)	Gliptálico	3 (105)	10 (150)	$10^{11} \dots 10^{12}$	$5^{(1)} \dots 6^{(1)}$	El esmalte de secado en caliente forma películas de color gris, resistentes a las chispas y al aceite mineral. Se utiliza para el recubrimiento de arrollamientos rotatorios y fijos
ГФ (GF)-92-ХС (JS) (СВД) (SVD)		2 ⁽¹⁾ (2 ⁽¹⁾)	1 (150)	$10^{10} \dots 10^{11}$	$30 \dots 32$	El esmalte de secado en frío forma películas de color gris, resistentes a las chispas y al aceite mineral. Se utiliza para recubrir arrollamientos fijos
ЭП (EP)-91	Epoxídica	2 (180)	6 (150)	$10^{12} \dots 10^{13}$	$5^{(1)} \dots 7^{(1)}$	Resistente al calor (130 °C) de secado caliente, forma películas resistentes a la humedad y al aceite mineral. El secado es escalonado: 2 h a 20 °C y 2 h a 150 °C

Tabla 6. (continuación)

Marca del esmalte*)	Base del esmalte (barniz)	Tiempo de secado y temperatura, °C	Termoelastidad de las películas, h, temperatura de ensayo, °C	Características eléctricas a 20 °C			Campo de aplicación
				ρ_v , $\Omega \cdot m$	E_r , MV/m		
KO-918	Silicónico**	2 (200)	150 (200)	$10^{12} \dots 10^{13}$	60...70		Esmalte resistente al calor, forma películas duras de color rosa que poseen elevada resistencia al aceite mineral y al agua. Resistencia al calor de 180 °C
KC-935	Idem**	2 (130)	80 (200)	$10^{11} \dots 10^{12}$	40...60		Idem, pero se seca a temperatura reducida (120 °C). Las películas que se originan poseen resistencia al agua y al enmohecimiento. Resistencia al calor de 180 °C

* Entre paréntesis se indican las designaciones anteriores de los esmaltes.

** Todos los esmaltes silicónicos se utilizan para recubrir los arrollamientos (de las máquinas eléctricas y aparatos) impregnados con barnices silicónicos.

Los esmaltes a base de barnices epoxídicos se caracterizan por su buena pegajosidad (adhesividad) y elevada resistencia al calentamiento (hasta 155 °C).

Representan gran interés los esmaltes electroaislantes a base de barnices de silicona, que se caracterizan por su alta resistencia al calentamiento (de 180 a 200 °C).

En las tablas 5 y 6 se exponen las características principales de varios barnices y esmaltes electroaislantes *.

§ 19. Compuestos

Los compuestos son composiciones electroaislantes que se confeccionan de varias sustancias de partida: resinas, betunes. En el momento de su empleo los compuestos son líquidos, que se solidifican paulatinamente, convirtiéndose en dieléctrico sólido monolítico.

A diferencia de los barnices y esmaltes los compuestos no contienen disolventes volátiles. Al secar la capa de barniz los disolventes se evaporan y, al volatizarse, forman en la película de barniz poros y capilares. Ello conduce a la disminución de la resistencia a la humedad del aislamiento impregnado de barniz. La ausencia de disolventes en los compuestos garantiza la integridad del compuesto después de su solidificación. De acuerdo a su destino los compuestos se dividen en impregnantes, selladores de juntas y embadurnadores.

Los compuestos impregnantes se emplean para la impregnación de los arrollamientos de las máquinas y aparatos eléctricos con el fin de cementar las espiras del arrollamiento y protegerlas contra la humedad; los selladores de juntas se utilizan para rellenar las cavidades (espacios libres) en los acoplamientos de cable y cajas terminales, y asimismo en los cuerpos de los aparatos eléctricos: transformadores de corriente, bobinas, etc.

Los compuestos pueden ser materiales termoendurecibles, incapaces de ablandarse después de su solidificación,

* Para mayor detalle véase: *Nikulín N. V.* «Prontuario del joven eléctrico respecto a materiales y artículos electrotécnicos». Moscú, Vysshaya shkola. 1982 (en ruso).

o termoplásticos, que pueden ablandarse durante el calentamiento ulterior. A los termoplásticos pertenecen los compuestos basados en los betunes, dieléctricos parecidos a la cera (parafina, ceresina y otros), los polímeros termoplásticos (poliestireno y otros).

Los compuestos termoplásticos basados en los betunes han obtenido amplia aplicación en la electrotécnica, ya que estos últimos son materiales baratos, resistentes al agua y poseen buenas propiedades electroaislantes.

Por ejemplo, para la impregnación de los arrollamientos de las máquinas eléctricas se utiliza ampliamente el compuesto impregnante de betún № 225, que se obtiene como resultado de la fusión del betún, colofonia y aceite de linaza, tomados en proporciones determinadas. En estado sólido el compuesto № 225 es una masa de color negro y superficie brillante.

Las características fundamentales del compuesto № 225 son: densidad 950 kg/m^3 ; temperatura de reblandecimiento (según el método «del anillo y de la bola») $98...112^\circ\text{C}$; resistencia al frío -25°C ; contracción volumétrica de 7 a 8 %; $\rho_v = 10^{10}...10^{12} \text{ } \Omega\cdot\text{m}$; $E_r = 18...20 \text{ MV/m}$.

Para la impregnación de los arrollamientos el compuesto se calienta hasta $160...170^\circ\text{C}$. A esta temperatura el compuesto pasa el estado líquido y entonces sus partículas se hacen capaces de penetrar en el interior del arrollamiento a impregnar. La impregnación de los arrollamientos con compuestos líquidos de betún se efectúa en calderas para impregnar, que se cierran herméticamente. Los arrollamientos, colocados en las calderas para impregnar, primero se secan al vacío a una temperatura de 10 a 180°C *. Después en la caldera para impregnar se introduce el compuesto líquido calentado, que comienza a penetrar en los poros abiertos del aislamiento de los arrollamientos. Luego en la caldera se eleva la presión hasta $(6...8)\cdot 10^5 \text{ Pa}$. Bajo la acción de la presión el compuesto líquido penetra en los poros del aislamiento de los arrollamientos y, simultáneamente, los comprime. Los arrollamientos impregnados se someten a secamiento

* La temperatura se establece en dependencia de la clase de resistencia al calentamiento del aislamiento de los arrollamientos.

complementario. Para los distintos arrollamientos y compuestos se elaboran diferentes regímenes de impregnación.

Como resultado de la impregnación se obtiene un aislamiento de los arrollamientos monolítico, de elevadas resistencias mecánica y eléctrica y estable a los vapores de agua.

Los betunes son materiales termoplásticos, por lo que los compuestos de betún se emplean, como regla, para la impregnación de los arrollamientos fijos. Si los arrollamientos son giratorios (al ser sobrecalentados éstos) el compuesto de betún puede fluir (particularmente bajo la acción de las fuerzas centrífugas). Tampoco se deben impregnar con compuestos de betún los arrollamientos que funcionan en aceite para transformadores o que se someten a la acción de la gasolina, keroseno, ya que todos los betunes se disuelven en los aceites minerales y en los hidrocarburos (gasolina, benceno y otros).

Entre los compuestos de betún para sellar juntas han obtenido amplia utilización los compuestos МБ (МБ)-70, МБ-90, МБМ (МБМ)-1 y МБМ-2. Los dos primeros compuestos se confeccionan a base de betunes de petróleo, tomados en distintas relaciones. Los compuestos МБМ-1 y МБМ-2 se confeccionan a base de betunes, pero para elevar su resistencia al frío en ellos se introduce también aceite para transformadores. Los compuestos enumerados se emplean para sellar las cavidades en los acoplamientos de cable y en los terminales para tensión de hasta 10 kV.

Ofrecen un gran interés práctico los compuestos term endurecibles que no reblandecen durante el calentamiento ulterior. A éstos pertenecen los compuestos МБК (МБК), que simultáneamente son impregnantes y selladores de juntas, cuyas bases son las resinas epoxídicas y otras.

Los compuestos МБК* se confeccionan a base de los ésteres del ácido metacrílico introduciendo en ellos endurecedores, plastificantes o sin ellos. En estado inicial los compuestos МБК son líquidos transparentes de matiz amarillento que, al calentarlos, forman bloques aislantes duros. En estado líquido los compuestos МБК tienen buena capacidad de impregnación.

* Compuesto metacrílico-buflíico.

Los compuestos MBK con endurecedores introducidos se solidifican a 20 °C en el transcurso de 20 a 24 h, y sin endurecedores en el transcurso de 8 a 10 h, pero calentándolos hasta 75 °C. En estado sólido los compuestos son inertes respecto al cobre, resistentes al agua y poseen buenas propiedades electroaislantes.

El compuesto MBK-1, en estado sólido, representa una masa dura inflexible. Los compuestos MBK-2 y MBK-3 forman masas sólidas elásticas, pues en ellas se introducen plastificantes: líquidos oleosos.

Los compuestos MBK se emplean en el intervalo de temperaturas desde -60 hasta + 110 °C (sin rellenedor). Al introducir en el compuesto una carga mineral éste puede ser empleado a temperaturas desde - 60 hasta + 120 °C.

En estado sólido los compuestos MBK tienen las siguientes características: densidad 1000 kg/m³; $\sigma_t = (70...80) \times 10^5$ N/m² (MBK-1); $\sigma_t = (5...11) \times 10^5$ N/m² (MBK-2 y MBK-3); $\rho_v = 10^{11}...10^{12}$ $\Omega \cdot m$; $\epsilon = 3,2...5,2$; $tg\delta = 0,03...0,09$; $E_r = 10...15$ MV/m. La contracción volumétrica (reducción del volumen durante la solidificación) en estos compuestos es de 5 a 6 %.

Los compuestos MBK se suministran en forma de líquidos. En este estado pueden disolver o provocar el hinchamiento de la goma y de las películas de ciertos barnices. En presencia de la goma los compuestos MBK no se solidifican, lo que es un defecto de éstos.

Los compuestos a base de resinas epoxídicas han obtenido un empleo grande. Estos compuestos representan mezclas de una de las resinas epoxídicas con endurecedores (anhídridos de los ácidos ftálico y maleico y otras sustancias). Estos compuestos se distinguen por su buena pegajosidad (adhesividad) a los metales, cerámica, plásticos y aislamiento fibroso de los arrollamientos; poseen elevada resistencia mecánica y pequeña contracción volumétrica (0,5...1,5 %). En dependencia del endurecedor elegido los compuestos epoxídicos pueden pasar de estado líquido al sólido a temperaturas elevadas (120...140 °C) o a la temperatura ambiente. Si en la resina epoxídica líquida se introducen anhídridos de los ácidos ftálico o maleico entonces la solidificación de los compuestos suce-

de a la temperatura de 120 a 140 °C en el transcurso de 4 a 10 h. Al utilizar otros endurecedores, por ejemplo, hexametilendiamina y algunos otros, la solidificación de los compuestos epoxídicos transcurre a la temperatura ambiente en el transcurso de 20 a 24 h. Semejantes compuestos se denominan compuestos de solidificación en frío. El compuesto epoxídico solidificado representa un bloque duro que tiene un coeficiente de dilatación lineal relativamente pequeño ($\approx 6 \cdot 10^{-5} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$). Para disminuir la fragilidad de los compuestos epoxídicos se introducen en ellos plastificantes, líquidos oleosos sintéticos: ftalato dibutílico, poliésteres y otros.

Con el fin de elevar el coeficiente de conductibilidad térmica de los compuestos epoxídicos y mejoramiento de sus características mecánicas, en las composiciones líquidas originales se introducen cargas minerales: cuarzo pulverizado, talco triturado y otras. La introducción de cargas conduce a la disminución de la fluidez del compuesto líquido. Los compuestos con cargas se emplean fundamentalmente para sellar cavidades grandes con gran cantidad de partes metálicas.

Las características fundamentales de los compuestos epoxídicos solidificados son: densidad 1200...1700 kg/m³; $\sigma_t = (450...600) \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$; $a = 8...12 \text{ kJ/m}^2$; resistencia al calor 80...110 °C; resistencia al frío — (40...60) °C; $\rho_v = 10^{12}...10^{13} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$; $\epsilon = 3,8...5,0$; $\text{tg} \delta = 0,02...0,05$; $E_r = 10...25 \text{ MV/m}$; higroscopia (en 24 h) 0,05...0,08 % en masa.

Los compuestos en los que se han introducido cargas (cuarzo pulverizado y otras) tienen una máxima resistencia mecánica.

En calidad de composiciones impregnadoras resistentes al calentamiento se emplean los compuestos silicónicos, y también los epoxídicos silicónicos. La particularidad distintiva de estos compuestos es su elevada resistencia al calentamiento (hasta 180 °C) y resistencia al frío (hasta — 60 °C).

La solidificación de los compuestos puros de silicona sucede en etapas: al principio a la temperatura de 150 °C y luego a 200 °C; la contracción volumétrica es de 5 a 6 %. Estos compuestos tienen pequeña viscosidad y elevada

capacidad de impregnación. Se utilizan para la impregnación de los arrollamientos de las máquinas eléctricas de ejecución resistente al calentamiento y a la humedad.

En estado sólido estos compuestos pueden funcionar en un intervalo de temperaturas desde -60 hasta $+200$ °C. Se distinguen por tener buenas características eléctricas: $\rho_v = 10^{12} \dots 10^{13} \Omega \cdot m$; $\epsilon = 3,0 \dots 3,5$; $\text{tg} \delta = 0,003$; $E_r = 50 \dots 60$ MV/m.

§ 20. Papeles y cartones

De la madera de las especies coníferas (pino, abeto), mediante su elaboración química, se obtiene la celulosa, que es materia prima para la fabricación de distintos papeles y cartones electroaislantes. En la composición de la madera, además de la celulosa, entran la lignina, sustancias resinosas y otras que, permaneciendo en la celulosa, comunican al papel fragilidad y empeoran las propiedades electroaislantes. Cuanto menos impurezas haya en los papeles tanto más resistentes y elásticos serán éstos y envejecerán más lentamente. Por esto, durante la elaboración química de la madera en celulosa destinada para la fabricación de papeles electroaislantes, el problema principal consiste en separar totalmente la lignina, las resinas y otras sustancias contaminadoras de la madera y obtener una celulosa técnicamente pura.

Antes de la elaboración química la madera se limpia de nudos y de las partes deterioradas por la podredumbre, y se tritura en astillas. Para transformar las astillas en celulosa éstas se cuecen en calderas cerradas (autoclaves) utilizando sustancias ácidas o alcalinas: productos químicos. La cocción de las astillas se efectúa a temperaturas de 150 a 175 °C y presiones de $(7 \dots 9) \times 10^5$ Pa en medio ácido o alcalino. En los casos de cocción ácida en la caldera se introduce una disolución de bisulfito de calcio $\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$ en ácido sulfuroso H_2SO_3 , y en el caso de cocción alcalina se introduce una mezcla de hidrato sódico NaOH y de sulfuro sódico Na_2S . Como resultado de la cocción ácida de la madera se obtiene la denominada celulosa al sulfito, y como resultado de la cocción alcalina se obtiene la celulosa al sulfato.

Para la fabricación de papeles y cartones electroaislantes se emplea principalmente la celulosa al sulfato, que comunica al papel mejores propiedades eléctricas, mecánicas y térmicas.

La celulosa obtenida después de la cocción se lava con agua y luego se somete a molienda en húmedo en baños especiales (pilas) dotados de un tambor giratorio con cuchillas. El fondo del baño tiene un resalte en forma de lomo. Las fibras limpias por la cocción, al caer entre las cuchillas del tambor y el resalte agudo del lomo, se despedazan en partes menudas y se desintegran a lo largo en fibras aún más finas. Según sea la magnitud de la holgura entre las cuchillas y el resalte del lomo se realiza una molienda grasa o magra. Para la molienda grasa se ponen cuchillas embotadas a bastante distancia del resalte del lomo en el fondo del baño. Como resultado solamente tiene lugar la desintegración o cardado en fibras finas. Así pues, durante la molienda grasa las fibras no se destruyen mecánicamente, y sus canales capilares permanecen cerrados. Para obtener celulosa de molienda magra se utilizan cuchillas afiladas. La distancia entre éstas y el lomo es menor que en el primer caso. Con esto las fibras de la celulosa, principalmente, se cortan transversalmente, como resultado de lo cual se ponen al descubierto los canales internos.

Durante la molienda grasa las fibras que se obtienen son largas y finas. El papel fabricado de celulosa de molienda grasa posee más flexibilidad y mayor resistencia mecánica. La molienda magra, por el contrario, da fibras cortas y gruesas que determinan la porosidad del papel, pequeña resistencia mecánica, y asimismo mayor capacidad de absorber agua y otros líquidos.

La celulosa molida se denomina pasta de papel. Para la fabricación de papel la pasta se conduce a la red metálica movable de la máquina para la fabricación de papel, contra cuya superficie se aprieta con los rodillos metálicos. Con esto el agua se exprime y se escapa a través de la red, mientras que la pasta se forma en hoja de papel que después pasa a la cinta de fieltro. Aquí la banda de papel se chafa primero con rodillos fríos, luego pasa a través de un sistema de rodillos de fundición fríos y después se

comprime con un sistema de lisas frías, enrollándola a continuación en rollos.

La humedad de los papeles se encuentra en los límites de 5 a 9 %. Con el aumento de la humedad del papel sus propiedades electroaislantes y resistencia mecánica empeoran considerablemente. Son características importantes del papel: la densidad, el esfuerzo de ruptura durante la tracción, y también la permeabilidad al aire. Esta última es el volumen de aire (en mililitros) que pasa en un minuto a través de una muestra de papel con área de 10 cm^2 a un vacío de $9 \cdot 10^3 \text{ Pa}$. Es obvio que los papeles más densos poseen menor permeabilidad al aire y, por consiguiente, tienen capilares y poros de menor dimensión. Así, en los papeles para condensadores la permeabilidad al aire es de 3 a 5 ml/min, y en los papeles para revestir cables ésta es igual a 20...25 ml/min.

Los papeles electroaislantes se dividen en papeles para revestir cables, los para condensadores, impregnables, para devanado, de mica, papel crepé.

El papel para revestir cables forma el aislamiento fundamental de los cables de alta tensión. Este papel, una vez enrollado en el cable, se impregna con aceite electroaislante. Las cintas de papel, al enrollarlas al alma del cable, se someten a tensado mecánico. Por esto, el papel para revestir cables debe poseer una resistencia mecánica a la tracción suficientemente alta. Además, en el cable preparado, durante el proceso de su tendido, el papel enrollado puede someterse a flexiones y, por consiguiente, debe poseer una resistencia considerable a los doblecimientos.

Los papeles para revestir cables se fabrican de celulosa al sulfato, preferentemente de molienda grasa, y ello garantiza buenas propiedades mecánicas. La molienda grasa, además, comunica al papel mayor densidad y pequeña porosidad. La sustancia líquida impregnante (aceite o un compuesto de aceite y colofonia) se deshace por el papel durante la impregnación en películas finas y canales, hecho que eleva su rigidez eléctrica. La rigidez eléctrica del papel no impregnado para revestir cables es de 6 a 9 MV/m, mientras que la del papel impregnado con aceite para transformadores es de 80 a 70 MV/m.

Los papeles para el revestimiento de cables se fabrican para el aislamiento de las almas de los cables de fuerza destinados a funcionar con tensiones de 35 kV, 110 kV y 220 kV.

Los grupos enumerados de papeles para el revestimiento de cables se diferencian entre sí por la cantidad de capas, espesor, masa de volumen, permeabilidad al aire y otras características.

Los papeles para revestir cables marcados con letras* K (K-080; K-120; K-170) y KB (KV) (KB-030; KB-045; KB-080; KB-120; KB-170; KB-240) se fabrican de dos capas, y los papeles que se marcan con las letras KM (KM-120; KM-170) y KBM (KVM) (KBM-080; KBM-120; KBM-170) se componen de tres y cuatro capas. Los papeles de capas múltiples, en comparación con los de dos capas, poseen mayor flexibilidad, elasticidad y tienen menor permeabilidad al aire y, por consiguiente, mayor resistencia eléctrica. La densidad es de 760 a 850 kg/m³.

Además de los enumerados se fabrican también papeles comprimidos para el revestimiento de cables, que se marcan con las letras KBV (espesor: desde 0,15 mm hasta 0,120 mm) y KBMV (KBMV-0,80; KBMV-120). Los papeles comprimidos se caracterizan por su gran densidad, 1100 kg/m³, menores discrepancias en el espesor, menor permeabilidad al aire, lo que les garantiza valores más elevados de las características mecánicas y eléctricas. Los papeles comprimidos para revestir cables se emplean para el aislamiento de las almas de los cables para tensiones desde 110 kV y más.

Todos los papeles son materiales higroscópicos, humedecen con facilidad en el aire húmedo, por lo que todos los trabajos de aplicación del aislamiento de papel deben efectuarse en condiciones de un estricto acondicionamiento del aire circundante. El aislamiento de papel para revestir cables, antes de ser impregnado con dieléctricos líquidos, se somete a un prolongado secamiento.

* Las cifras indican el espesor en micras y las letras marcan lo siguiente: K, para el revestimiento de cable; KB, para revestir cables, de alta tensión; KBM, para revestir cables, de alta tensión y capas múltiples; V, comprimido.

El papel para condensadores, impregnado con dieléctrico líquido, se emplea en los condensadores de papel. Para la fabricación de este papel se utiliza la celulosa al sulfato más pura de molienda grasa. Estos son los papeles más finos (su espesor oscila entre 0,004 hasta 0,030 mm), homogéneos en todo su espesor. Su densidad es de 1000 a 1250 kg/m³. Su permeabilidad al aire no es grande (3...10 ml/min), lo que indica su relativamente elevada rigidez eléctrica, que oscila desde 19 hasta 65 MV/m, en conformidad con su espesor*.

Habiendo sido impregnados con aceite mineral para condensadores la rigidez eléctrica de los papeles para condensadores aumenta y se encuentra en los límites desde 250 hasta 300 MV/m. Los papeles para condensadores contienen una cantidad mínima de partículas conductoras (no metálicas y otras), lo que garantiza un alto nivel de las características eléctricas. El límite de rotura durante la tracción de los papeles para condensadores alcanza $\sigma_t = 100 \cdot 10^5$ N/m². El papel para condensadores se despacha en rollos con anchura desde 12 hasta 750 mm.

El papel impregnable se destina para la fabricación de un plástico electroaislante estratiforme: papel laminado baquelizado. El papel impregnable se fabrica de celulosa al sulfato y tiene espesor 0,09; 0,11 y 0,13 mm, siendo la densidad de 600 a 800 kg/m³. Por esto en los papeles impregnables la permeabilidad al aire y la inhibición es mayor que en otros papeles, cosa necesaria para asegurar una buena impregnación del papel durante la fabricación de papel laminado baquelizado.

El papel para devanado se emplea para la fabricación de artículos electroaislantes devanados: cilindros y tubos aislantes para los transformadores y aparatos eléctricos.

El papel para devanado se fabrica de celulosa no blanqueada de molienda grasa, tiene una densidad de 750 kg/m³, espesor de 0,05 y 0,07 mm, rigidez eléctrica no menor de 8 MV/m.

Para la fabricación de cilindros electroaislantes el papel debe estar cubierto, por una cara, de barniz electroaislante.

* Al aumentar el espesor la rigidez eléctrica del papel disminuye.

El papel de mica se emplea para la fabricación de cinta elástica de mica, para lo que en la lámina de papel se pegan hojitas de mica. El papel de mica debe garantizar la elasticidad de la cinta de mica, elevar su resistencia mecánica a la rotura y ser fino al mismo tiempo, para no empeorar las características eléctricas de la cinta de mica. Este papel debe poseer también una porosidad grande, para que sea posible una buena y rápida impregnación con barnices.

Para la fabricación de papel de mica se utiliza el algodón de fibra larga con fibras orientadas fundamentalmente en la dirección de la longitud del pliego de papel. Esto garantiza al papel una resistencia mecánica grande: en la dirección a lo largo del pliego de papel $750 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$, y en la dirección transversal a éste $90 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$. El papel de mica se despacha en rollos de 450 y 900 mm de anchura. El espesor del papel es de 18 a 20 μm (0,018...0,020 mm).

El papel crepé se emplea para el aislamiento de las derivaciones y puntos de empalme en los arrollamientos de los transformadores y otros aparatos eléctricos en baños de aceite.

Este papel tiene en la superficie ondulaciones (gofrado) trazadas perpendicularmente a la dirección del pliego de papel. Gracias a ello el papel crepé posee flexibilidad y se estira bien en la dirección longitudinal (alargamiento 60 %), lo que permite aislar con seguridad las derivaciones de los arrollamientos y los conductores encorvados de conexión, por ejemplo, en los transformadores.

El papel crepé se fabrica de celulosa al sulfato no blanqueada, su espesor es de 0,17 mm (sin la ondulación) y 0,5 mm (con ésta), y la densidad es de 230 kg/m^3 . El papel se despacha en rollos con anchura de 500 mm.

La utilización del papel crepé electroaislante en lugar de las costosas telas barnizadas ha dado un gran efecto económico sin reducir la rigidez eléctrica del aislamiento de los terminales.

Los cartones electroaislantes se fabrican con el mismo método que los papeles, pero tienen mayor espesor (desde 0,1 hasta 0,6 mm). La materia prima para la fabricación de cartones es la pasta de celulosa al sulfato o la mezcla de celulosa con fibras de algodón (estas últimas garantizan

elevadas propiedades mecánicas y electroaislantes del cartón). El proceso de producción de los cartones es análogo al proceso de fabricación de los papeles, pero se utilizan equipos algo distintos y se introducen operaciones tecnológicas complementarias para la formación del lienzo de cartón y el acabado. Los cartones de espesor desde 0,1 hasta 0,8 mm se despachan en rollos de 1015 mm de ancho; los cartones de espesor desde 1 mm y más se despachan en chapas de distintas dimensiones: hasta 3×4 m.

Los cartones destinados para el trabajo al aire libre, los llamados cartones «de aire» se fabrican de una mezcla de celulosa y fibra de algodón. Estos cartones experimentan un tratamiento posterior en rodillos de acero para su compactación y pulido. En ciertos cartones se introducen sustancias adherentes a base de colofonia y almidón, con el fin de disminuir la higroscopicidad y obtener una estructura más densa.

Los cartones que se emplean en las máquinas y aparatos bañados en aceite (transformadores y otros), los llamados cartones «de aceite», se fabrican de una mezcla de celulosa al sulfato y fibras de algodón, sin tratamiento complementario en los rodillos. Estos cartones tienen una estructura algo porosa, por lo que se impregnan bien con aceite.

Los cartones para trabajar al aire libre se despachan en chapas y rollos con anchura de 1050 mm y espesor desde 0,1 hasta 3,0 mm. La densidad de estos cartones es de 950 a 1250 kg/m³; el esfuerzo de rotura durante la tracción es de $(8,5...13) \cdot 10^5$ N/m²; la rigidez eléctrica varía desde 8 hasta 13 MV/m, en dependencia del espesor. Los cartones de aire se emplean para el aislamiento de ranura y entre espiras en las máquinas eléctricas de baja tensión.

Los cartones para trabajar en aceite se fabrican con espesor desde 0,5 hasta 3 mm, su densidad es de 900 a 1200 kg/m³, el esfuerzo de rotura durante la tracción es de $(4...6) \cdot 10^5$ N/m² (en la dirección transversal), la rigidez eléctrica en estado impregnado es de 38 a 60 MV/m.

La fibra vulcanizada se fabrica de papel no encolado que tiene en su composición hilos de algodón y celulosa de

madera (50 % de cada uno). El papel se deja pasar por un baño con disolución caliente (hasta 50 °C) de cloruro de zinc, y luego se enrolla en un tambor de acero hasta un grosor determinado. Al tratar el papel con la disolución de cloruro de zinc en su superficie se forma una sustancia adhesiva. Al enrollar en el tambor las hojas de papel se pegan unas y otras, formando un material compacto, la fibra vulcanizada que se corta en chapas y se prensa. El cloruro de zinc que no reaccionó se separa de la fibra vulcanizada dejando pasar los artículos de fibra vulcanizada (chapas, barras) a través de tinas con disoluciones de cloruro de zinc cuya concentración disminuye gradualmente. El lavado final de la fibra vulcanizada se efectúa con agua.

La densidad de la fibra vulcanizada es de 1150 kg/m³. Esta posee una alta resistencia al esfuerzo de tracción; $\sigma_t = (500...700) \cdot 10^5$ N/m² (en dirección longitudinal) y de $(300...450) \cdot 10^5$ N/m² en dirección transversal).

Con la fibra vulcanizada se fabrican chapas con espesor desde 0,6 hasta 20 mm y más, y asimismo barras y tubos. La fibra vulcanizada es de fácil tratamiento mecánico: se sierra, taladra, cepilla y talla. La fibra vulcanizada en chapas se estampa, y al remojarla en agua se pueden moldear con ella artículos de perfil complejo. Son defectos de la fibra vulcanizada su higroscopicidad y su hinchamiento en ambiente húmedo. Después del secado la fibra vulcanizada revela *encogimiento lo que dificulta* la fabricación de piezas precisas de este material. Sus características eléctricas no son grandes: $\rho_v = 10^6...10^7$ $\Omega \cdot m$; $E_r = 3,5...5,0$ MV/m.

En la electrotécnica la fibra vulcanizada de la marca ФЭ (FE) (electrotécnica) se utiliza en calidad de material electroaislante en los equipos eléctricos de baja tensión, por ejemplo, en calidad de cuñas de ranura y jurtas en las máquinas eléctricas de ejecución no resistente a la humedad. La fibra vulcanizada se emplea para la fabricación de descargadores de alta tensión en los que las paredes del cilindro de fibra, bajo la acción del arco eléctrico, desprenden gases intensamente. Como resultado de la creciente presión de los gases en el interior del descargador *con fusible el arco interrumpe su combustión*.

§ 21. Telas barnizadas, cintas y tubos barnizados

Las telas barnizadas son materiales flexibles en rollos compuestos de alguna urdimbre impregnada con barniz electroaislante. En calidad de urdimbres se emplean tejidos de algodón, de seda, de caprón y de vidrio (de fibras de vidrio). El barniz con el que se impregnan las urdimbres de tejido, una vez solidificado, forma en la tela barnizada una película flexible que garantiza al material altas propiedades electroaislantes, mientras que la urdimbre comunica a la tela barnizada resistencia mecánica. Las telas barnizadas encuentran amplia aplicación en calidad de aislamiento de ranura y entre espiras en las máquinas eléctricas de baja tensión y también en los transformadores *. Además, las telas barnizadas se emplean para el aislamiento exterior de las bobinas y ciertos grupos de conductores en los aparatos e instrumentos eléctricos. En la mayoría de los casos las telas barnizadas se aplican en forma de cintas cortadas bajo un ángulo de 45° respecto a la urdimbre. Semejantes cintas de tela barnizada garantizan máxima elasticidad, lo que hace posible aislar con ellas las partes frontales de los arrollamientos y los empalmes de perfil moldeado.

Según sea la urdimbre empleada las telas barnizadas se dividen en las de algodón, de seda, de caprón y de vidrio (tejido barnizado de lana de vidrio).

En calidad de urdimbres de las telas barnizadas de algodón se emplean tejidos resistentes (percal y otros). Las urdimbres de las telas de seda barnizadas son tejidos finos (0,04...0,08 mm) de seda natural. Para ciertas clases de telas barnizadas elásticas de elevada resistencia mecánica se emplean los tejidos de caprón. Para las telas barnizadas de elevada resistencia al calor se emplean tejidos de vidrio, fabricados de vidrio electroaislante sin álcalis. Las telas de vidrio resistentes al calor se impregnan con barnices de silicona, cuyas películas pueden trabajar a temperaturas de hasta 180 °C.

* En los transformadores con aislamiento de aceite se emplean telas barnizadas (óleoresistentes marca JXMM (LMM)-105.

Los tejidos de seda y de caprón se impregnan con barnices transparentes al óleo. Los tejidos de algodón se impregnan con barnices al óleo claros o con barnices oleobituminosos negros, que garantizan a las telas barnizadas elevada resistencia a la humedad.

Las telas de algodón, seda, caprón y vidrio barnizadas con barnices al óleo, por su resistencia al calor pertenecen a la clase A, es decir, pueden emplearse si las temperaturas de trabajo no superan 105 °C. Pero las telas barnizadas con barnices de silicona pertenecen a la clase H por su resistencia a la humedad y resistencia al enmohecimiento.

Las telas barnizadas con barnices de silicona se emplean en las máquinas y aparatos eléctricos de ejecución resistente al calentamiento y tropical.

Las urdimbres fibrosas, antes de impregnarlas con barnices, se planchan (excepto los tejidos de vidrio). Para esto el tejido se deja pasar a través de rodillos de acero calientes (calandras), apretando todos los pelitos sobre la superficie del tejido. Después del calandrado el tejido se somete a impregnación con barniz electroaislante en una máquina de impregnar de muchos pisos. En la máquina de impregnar se obtiene tela barnizada acabada en rollos con anchura desde 800 hasta 1000 mm. Las telas barnizadas se fabrican de una anchura desde 700 hasta 1100 mm.

En la tabla 7 se exponen las características fundamentales de algunas telas barnizadas electroaislantes.

Igual que todos los materiales fibrosos las telas barnizadas soportan un esfuerzo máximo de rotura a tracción en la dirección de la urdimbre, es decir, a lo largo del tejido, y menor resistencia en dirección de la trama, es decir, a través de la tela. La higroscopicidad de las telas de algodón barnizadas es de 4,5 a 7,0 % de las de seda 3,5...6,0 % y de las de vidrio 1...2,0 %.

Las cintas adhesivas electroaislantes se fabrican a base de cintas de algodón o de vidrio (de fibra de vidrio), así como también a base de cinta de caucho masticado de polietileno de vinilo.

La cinta cauchotada de algodón es una cinta de tejido de algodón impregnada con un compuesto viscoso de goma.

Tabla 7. Características fundamentales de las telas barnizadas electroaislantes*

Tela barnizada	Marca	Espesor, mm	Esfuerzo de rotura a la tracción (por la urdimbre**), N/cm	Resistividad de volumen, $\Omega \cdot m$	Rigidez eléctrica, MV/m
De algodón con barnices al óleo	JXM-405 JXMC-405	0,45...0,3 0,47...0,2	45...80	$40^{11} \dots 40^{12}$ $40^{11} \dots 40^{12}$	25...40 27...42
De algodón con barnices oleobituminosos	JXE-405	0,47...0,24	50...75	$40^{11} \dots 40^{12}$	25...40
De seda con barnices al óleo	JHM-405 JHMC-405	0,08...0,15 0,04...0,15	22...30 40...30	$40^{12} \dots 40^{13}$ $40^{12} \dots 40^{13}$	28...58 20...42
De vidrio con barnices silicónicos	JCK-180 JCKP-180	0,05...0,2 0,12...0,2	25...170	$40^{12} \dots 40^{13}$ $40^{12} \dots 40^{13}$	30...40 36...55

* Más detalladamente sobre las telas barnizadas véase: Nikutin N. V. Manual del joven eléctrico sobre materiales y artículos electrotécnicos (en ruso).

** Los valores mayores pertenecen a las telas barnizadas de mayor espesor.

La cinta cauchotada aislante se despacha en rollos de 175 ± 25 mm de diámetro, y su anchura es de 10, 15, 40 y 50 mm. Los rollos de cinta aislante cauchotada deben guardarse a una temperatura no menor que $+5^{\circ}\text{C}$ y no mayor que $+25^{\circ}\text{C}$, ya que de lo contrario la cinta pierde rápidamente su adhesividad. La cinta debe conservar la adhesividad después de un calentamiento hasta 70°C (en el transcurso de un día). La cinta adhesiva cauchotada se utiliza durante el montaje para el aislamiento de los puntos de empalme de los conductores en las redes y dispositivos de baja tensión.

En los dispositivos de baja tensión ha obtenido una considerable aplicación la **cinta adhesiva de policloruro de vinilo**. Esta cinta se despacha en rollos de 80 ± 10 mm de diámetro y su anchura es de 15, 20, 25 y 50 mm. El espesor de la cinta es de 0,2 a 0,45 mm. Puede ser empleada hasta una temperatura de 60 a 65°C y a temperaturas mayores comienza a reblandecer.

La cinta adhesiva de hilo de vidrio, resistente al calor, se fabrica de cinta de hilo de vidrio (de vidrio no alcalino) impregnada con barniz de silicona resistente al calor. Esta cinta se fabrica en rollos de 150 ± 25 mm de diámetro, su anchura es de 10, 15, 20 y 25 mm y su espesor de 0,12...0,15 mm. Se utiliza para el aislamiento de las partes frontales de las máquinas y aparatos eléctricos cuyas temperaturas de trabajo son altas (hasta 180°C). La tensión disruptiva de la cinta de hilo de vidrio de 0,12 mm de espesor es de 600 a 700 V, y para la cinta de 0,15 mm de espesor esta tensión es igual a 750...860 V.

Los tubos de algodón barnizados (de linolina) son tubos (fundas) de hilado de algodón impregnado con barniz al óleo. Su diámetro interior es desde 0,5 hasta 16 mm y el espesor de su pared es desde 0,4 hasta 0,9 mm. La longitud de los tubos no es menor que 1000 mm. La tensión disruptiva de éstos es de 5 kV.

Los tubos de linolina pueden trabajar a temperaturas desde -50 hasta $+105^{\circ}\text{C}$. Se emplean para el aislamiento de los terminales de salida y lugares de empalme en los aparatos eléctricos, así como en los transformadores (secos y con aislamiento de aceite).

Los tubos de lavsán barnizados son tubos (fundas) de seda de lavsán (seda artificial) impregnados con barnices de poliésteres. Los tubos tienen un diámetro interno desde 0,5 hasta 10 mm y el espesor de su pared es desde 0,4 hasta 0,8 mm.

Los tubos de lavsán barnizados, en comparación con los de lixolina, poseen una resistencia mecánica considerablemente mayor y resistencia al desgaste. Un grupo de tubos de lavsán puede emplearse en el intervalo de temperaturas desde -50 hasta $+105$ °C (marca ТПЛ (TPL)), y otro grupo (marca ТЭЛ (TEL)) desde -50 hasta $+130$ °C. Los tubos se fabrican con longitud desde 1000 hasta 10 000 mm. Las características eléctricas de los tubos de lavsán se encuentran al mismo nivel que las de los tubos de linolina: $\rho_v = 10^6 \dots 10^7 \Omega \cdot m$; $E_r = 4 \dots 10$ MV/m.

Los tubos de fibra de vidrio barnizados son tubos (fundas) fabricados de hilado de fibra de vidrio impregnados con barniz al óleo, epoxídico o de silicona resistente al calor. Los tubos de fibra de vidrio barnizados tienen un diámetro interior desde 0,5 hasta 10 mm y el espesor de su pared es de 0,4 a 0,6 mm. En comparación con los tubos de linolina y de lavsán estos tubos son menos elásticos, pero poseen alta resistencia a la humedad y se emplean en las máquinas eléctricas y aparatos con temperatura de trabajo desde -50 hasta $+180$ °C (marca ТКС (TKS)), y los grupos restantes de tubos pueden emplearse a temperaturas desde -50 hasta $+105$ °C (marca ТЛС (TLS)) y desde -50 hasta $+130$ °C (marca ТЭС (TES)). Las esferas de aplicación de los tubos de fibra de vidrio son las mismas que las de los tubos de linolina y de lavsán. Todos los tipos de tubos electroaislantes que examinamos tienen suficiente flexibilidad.

§ 22. Materias plásticas

Las materias plásticas (plásticos) son artículos obtenidos de polvos de moldeo que, bajo las acciones del calentamiento y presión, reblandecen y adquieren las propiedades de flujo plástico. Como resultado de esto se pueden obtener, por moldeo o por prensado, artículos de plástico de

diferente forma (cuerpos y soportes de los aparatos eléctricos de medida, de las máquinas eléctricas, botones, palancas, coberturas y otros).

Los plásticos, como regla, son materiales de componentes múltiples, que constan de un aglutinante, cargas, plastificantes, estabilizadores, sustancias untuosas, endurecedores, colorantes, agentes porógenos y otras sustancias *.

Las sustancias aglutinantes son resinas sintéticas (resinas en estado A, epoxídicas, silicónicas y otras)**. Estas impregnan las cargas y otros componentes de los plásticos, les comunican plasticidad y aseguran el carácter monolítico de los artículos de plástico.

Los aglutinantes pueden ser sustancias termoplásticas o termoendurecibles. En caso de aglutinante termoplástico (policloruro de vinilo y otros) el artículo de plástico también será termoplástico, es decir, al calentarlo hasta cierta temperatura comenzará a ablandarse. Los aglutinantes termoendurecibles (resinas en estado A, silicónicas y otras) garantizan a los artículos termoendurecimiento: no ablandamiento de los artículos durante el calentamiento.

Las cargas o rellenos son sustancias en polvo o fibrosas que permiten elevar la resistencia mecánica y disminuir el encogimiento volumétrico de los artículos plásticos que se fabrican. Las cargas fibrosas (fibras de vidrio, asbesto y algodón) aumentan en grado considerable la resistencia mecánica de los plásticos. Las cargas inorgánicas (polvos de cuarzo y de mica, fibra de vidrio) elevan el coeficiente de conductibilidad térmica de los plásticos y aumentan su resistencia al calor. En los plásticos el contenido de cargas es de 40 a 60 %.

Los plastificantes son líquidos sintéticos espesos parecidos al aceite que se añaden a los plásticos para reducir su fragilidad y elevar su resistencia al frío.

* Algunas clases de plásticos son polímeros puros, por ejemplo, policloruro de vinilo, polietilenos y otros. Estos materiales se denominan plásticos sin carga.

** En los plásticos de composición inorgánica (cemento amiantado, micalex y otros) en calidad de aglutinantes se emplea el cemento portland, el vidrio y otras sustancias aglutinantes.

Los estabilizadores son sustancias que se introducen en los plásticos con el fin de aumentar su resistencia a la luz y al calor.

Las sustancias untuosas (estearina, ácido oleico) se añaden a los plásticos para una mejor separación de la pieza moldeada de la superficie del molde de acero.

Los endurecedores son sustancias que se introducen en ciertos plásticos con el fin de acelerar los procesos de su solidificación. La base de estos procesos son las reacciones de polimerización y policondensación.

Los colorantes son sustancias que transmiten a los artículos de plástico un colorido uniforme. Los colorantes se añaden tanto para dar un aspecto decorativo al artículo como para elevar la resistencia de éstos a la luz.

Los agentes porógenos son sustancias que durante el calentamiento desprenden una gran cantidad de gases que crean una estructura porosa en los artículos de plástico rellenos de gas. Eligiendo la composición y la cantidad de componentes del plástico se pueden obtener artículos de unas u otras propiedades mecánicas, térmicas y dieléctricas.

Los materiales originales de los que se fabrican los artículos de plástico son polvos de moldeo (polvos moldeables). Éstos son sustancias que comprenden aglutinante, cargas y otros componentes que entran en la composición del plástico. La característica fundamental de los polvos de moldeo es su fluidez, es decir, su capacidad de derramarse a presión en el molde de acero. Cuanto mayor sea la fluidez del polvo de moldeo tanto más complicada será la forma del artículo de plástico que se puede obtener. Cuanto menor sea la fluidez del polvo de moldeo tanto mayor deberá ser la magnitud de la presión específica durante el prensado de artículos de plástico.

El prensado de los artículos de plástico se efectúa en moldes de acero (fig. 17). Los moldes para los artículos de dimensiones pequeñas tienen varias cavidades, lo que permite obtener en un solo prensado varios artículos. La dosificación y carga del polvo en el molde se realiza automáticamente. A veces, para mayor comodidad de prensado, primero se fabrican preformas con el polvo de moldear: tabletas redondas que se moldean a presiones

relativamente pequeñas. Estas tabletas después se calientan y se meten en los moldes, en los que definitivamente, con prensado, se da forma acabada a la pieza. La mayoría de los artículos de plástico con destino electroaislante se obtienen por el método de prensado en caliente en moldes calentados hasta 120...200 °C, según sea la composición del polvo de moldeo. Algunos artículos de plástico pueden ser fabricados por prensado en frío, cuando la temperatura del polvo y del molde es de 20 °C. Los artículos prensados en frío, para garantizar un alto nivel de sus propiedades electroaislantes y mecánicas, deben someterse después a un tratamiento térmico: al calentamiento durante varias horas.

El espesor mínimo de las paredes de los artículos de plástico de prensado en caliente es de 1,5 mm. y el de las paredes de los prensados en frío es de 4 a 5 mm. La densidad de los plásticos es de 900 a 2800 kg/m³. La resistencia al calor de

los plásticos de vasta aplicación (fenoplastos, amino-plásticos) es de 105 a 120 °C. Los plásticos a base de sustancias aglutinantes silicónicas y cargas minerales (cuarzo molido, fibra de vidrio) poseen una resistencia al calor más elevada (180...220 °C). Los plásticos a base de sustancias aglutinantes silicónicas y epoxídicas se distinguen por su resistencia al enmohecimiento y a la humedad.

En comparación con los polímeros puros (polietileno, policloruro de vinilo y otros) los plásticos a base de éstos poseen propiedades electroaislantes algo reducidas. Ello está provocado por la adición a los polímeros de colorantes, cargas y otras sustancias con el fin de elevar la resis-

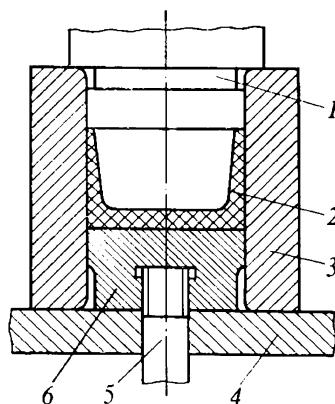


Fig. 17.

Molde (corte):

1, macho; 2, artículo prensado;
3, matriz; 4, placa; 5, vástago del
empujador; 6, empujador

tencia mecánica y la resistencia al calor de los plásticos. Las características eléctricas de los plásticos son las siguientes: $\rho_v = 10^8 \dots 10^{13} \Omega \cdot m$; $\epsilon = 5 \dots 8$; $\operatorname{tg} \delta = 0,002 \dots 0,08$; $E_r = 5 \dots 25 \text{ MV/m}$. Los plásticos a base de aglutinantes silicónicos poseen mejores características.

§ 23. Plásticos lamelados

Los plásticos lamelados son materiales de estructura estratiforme. Estos materiales constan de capas alternantes de carga en hojas (papel, tejido de algodón o de vidrio) y de sustancia aglutinante. Se emplean más ampliamente el cartón baquelizado, la textolita y el laminado de tela de fibra de vidrio.

El cartón baquelizado es un material estratiforme en chapa en el que la carga son hojas de papel impregnado con espesor de 0,10 a 0,12 mm. El proceso de producción del cartón baquelizado consiste en la impregnación del papel con barnices de baquelita y el corte ulterior de este papel en hojas de dimensiones determinadas.

Las hojas de papel impregnadas con barniz, después de secadas, se reúnen en paquetes de determinada masa, según sea el espesor del artículo a prensar. Los paquetes reunidos se prensan entre las placas de acero calentadas (hasta 160°C) de las prensas hidráulicas. Durante el prensado en caliente la resina fundida pega las hojas de papel impregnado y pasa al estado infusible. La presión del prensado es de 5 a 9 MPa y el tiempo de sazamiento es desde 2 hasta 5 minutos por cada 1 mm del espesor de la lámina que se prensa. Una vez terminado el proceso de prensado las tablas y chapas obtenidas se enfrían. Los bordes de las chapas y tablas de cartón baquelizado sacadas de la prensa se cortan con una sierra. La anchura de las chapas es de 450 a 930 mm y su longitud de 700 a 1430 mm.

El cartón baquelizado se fabrica en forma de chapas y tablas con espesor desde 0,2 hasta 50 mm con marcas I, II, III, IV y V, para utilizarlo en los equipos eléctricos con frecuencia industrial de 50 Hz, y VI, VII y VIII para trabajar con alta frecuencia.

El cartón baquelizado de las marcas V-1 y V-2 se caracteriza por su elevada rigidez eléctrica, el cartón baque-

lizado de las marcas III y IV tiene elevada resistencia a la humedad y el de las marcas I y II posee elevada resistencia mecánica.

El cartón baquelizado se utiliza para la fabricación de diferentes piezas y soportes electroaislantes. Se debe tener en cuenta que la resistencia del cartón baquelizado al arco no es grande, y después de algunas descargas por chispa en la superficie del cartón queda una huella carburada de gran conductibilidad. El cartón baquelizado cede con facilidad al tratamiento mecánico: se corta, se sierra, se taladra, y sus clases de chapas finas se estampan bien en estado caliente. El cartón baquelizado se emplea a temperaturas no mayores que 105°C (clase A de resistencia al calor). Su resistencia al frío es de -65°C .

La textolita se diferencia del cartón baquelizado en que en ella la carga es de tejido de algodón. La producción de la textolita no se diferencia considerablemente de la del cartón baquelizado. La textolita se fabrica de las marcas A (A), E (B) y Г (G), a base de tela y tejido de algodón, y de la marca ВЧ (VCh) (para altas frecuencias) a base de museína de algodón.

Las características eléctricas de la textolita son algo inferiores a las del cartón baquelizado, pero sin embargo en la textolita es mayor la resistencia al hendidamiento (a lo largo de las capas) y la resiliencia que alcanza $20\ldots 30\text{ kJ/m}^2$. La textolita cede mejor al tratamiento mecánico, pero se debe tener en cuenta que es considerablemente más cara que el cartón baquelizado. La textolita se despacha en chapas con espesor desde 0,5 hasta 50 mm y 0,5...8 mm (marca ВЧ). La anchura de las chapas es de 450 a 980 mm y su longitud de 600 a 1480 mm. La resistencia al calor de la textolita es de 105°C , y la resistencia al frío es de -65°C . La textolita, igual que el cartón baquelizado, posee pequeña resistencia al arco ya que su aglutinante, la resina de baquelita, se carbura fácilmente bajo la acción de las chispas eléctricas.

El laminado de tela de fibra de vidrio se diferencia de la textolita por el hecho de que la carga en él es de tejido electroaislante de lana de vidrio no alcalino. Este laminado posee elevada resistencia a la humedad y al calor, y sus características eléctricas y mecánicas son mejo-

res en comparación con las de la textolita y las del cartón baquelizado, pero es menos maquinable. El laminado de tela de fibra de vidrio se fabrica de varias marcas: CT (ST), a base de tejidos no alcalinos con aglutinante de resina fenolformaldehído; CTЭФ (STEF) y CTЭФ-1, a base de una mezcla de resinas epoxídica y silicónica y CTK (STK), a base de un aglutinante silicónico. El laminado de tela de fibra de vidrio se fabrica en chapas de 0,5 a 30 mm de espesor, 450...980 mm de anchura y 600...1480 mm de longitud. Las características fundamentales de los plásticos lamelados se exponen en la tabla 8.

Además, de los plásticos lamelados descritos, que se fabrican en forma de chapas y tablas, se fabrican también artículos lamelados electroaislantes enrollados en forma de cilindros, tubos, barras prensadas y diversas formas perfiladas.

Para estos artículos se emplea papel una cara del cual está cubierta de barniz de aparejo, y también tejidos barnizados de hilo de algodón y de vidrio.

Los artículos enrollados en forma de cilindros y tubos se fabrican enrollando el papel embarnizado o el tejido en un mandril de acero cuyo diámetro corresponde al diámetro interno del futuro artículo. El mandril yace sobre dos rodillos que se calientan y se aprieta por arriba con el tercer rodillo prensador caliente. La resina que se encuentra en la capa de papel o tela embarnizada se derriete en el mandril de acero caliente y pega las hojas entre sí. El espesor de los artículos se controla con dispositivos automáticos.

Los cilindros y los tubos que contienen papel en calidad de carga se denominan artículos de papel baquelizado. Éstos se fabrican con diámetro desde 10 hasta 1200 mm con espesor de la pared desde 1,5 hasta 8 mm y más. Después del enrollado estos artículos se someten a un tratamiento térmico (se cuecen) a una temperatura de 130 a 200 °C, según sea la composición del aglutinante. Puesto que la presión durante el enrollado es menor que la empleada durante el prensado de los materiales en chapa (cartón baquelizado y otros) los cilindros y los tubos son menos compactos. Los cilindros y tubos cocidos se liberan de los mandriles y se cortan por los

• **Tabla 8. Características fundamentales de los plásticos lamelados**

Características	Cartón baquelizado de baja frecuencia I, II, III y V	Textolita de balsa frecuencia A, B, I*	Laminado de tela de vidrio sobre la base de resina aglutinante		
			fenolformal- dehídricas	silicónicas	epoxídicas y silicónicas
Densidad, kg/m ³	1350...1450	1300...1450	1600...1700	1700...1800	1800...1900
Esfuerzo de ro- tura durante la flexión, N/m ²	(1000...1250) · 10 ⁵	(900...1100) · 10 ⁵	(950...1200) · 10 ⁵	(1500...1700) · 10 ⁵	(2000...4200) · 10 ⁵
Esfuerzo de ro- tura durante la tracción, N/m ²	(800...1000) · 10 ⁵	(560...600) · 10 ⁵	(700...900) · 10 ⁵	(900...1200) · 10 ⁵	(1750...2500) · 10 ⁵
Resiliencia, kJ/m ²	12...20	17...30	14...50	20...50	440...250
Resistencia al calor (según Martens), °C	150...160	135...150	185...200	250...260	185...200
Resistividad de volumen, Ω·m	10 ⁸ ...10 ⁹	10 ⁷ ...10 ⁹	10 ⁹ ...10 ¹⁰	10 ¹¹ ...10 ¹²	10 ¹¹ ...10 ¹²
Permitividad dieléctrica	6...8	6...7	5...7	5...6	6...7
Tangente del ángulo de pérdi- das dieléctricas (a 50 Hz)	0,04...0,08	0,08...0,18	0,07...0,09	0,006...0,012	0,008...0,014
Rigidez eléctri- ca*, MV/m	12...20	5...10	12...20	18...30	15...25

* En la dirección perpendicular a las capas; en la dirección paralela a las capas la rigidez eléctrica será inferior a las señaladas en la tabla.

extremos. Los lugares del corte se barnizan, después de lo cual los artículos se cuecen de nuevo. La esfera principal de la utilización de los cilindros y tubos baquelizados es el aislamiento interno en los transformadores y aparatos eléctricos. Las características mecánicas y eléctricas de los artículos enrollados son algo inferiores a las de los plásticos prensados: cartón baquelizado, textolita y laminado de tela de fibra de vidrio.

§ 24. Materiales micáceos

La mica es un mineral natural de típica estructura estratiforme que permite desintegrar los cristales de mica en hojitas finas cuyo espesor es de hasta 0,006 mm. Las hojitas finas de mica poseen flexibilidad, son elásticas y tienen un esfuerzo grande de rotura a tracción $\sigma_t = (15...35) \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$. Pegando las hojitas de mica con resinas o barnices de aparejo (de goma laca, oleobituminoso y otros) se obtiene un aislamiento de mica duro (micanita) o flexible (cinta de mica) para los arrollamientos de las máquinas eléctricas.

Del grupo bastante grande de micas naturales solamente se utilizan en calidad de materiales electroaislantes la muscovita y la flogopita, pues se distinguen por su fácil desintegración y buenas características eléctricas.

La muscovita es una mica potásica ($\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \times 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). El color de los cristales de muscovita es fundamentalmente de plata, a veces con matiz verdoso o rojizo. Las hojitas finas de esta mica (0,05...0,06 mm) son transparentes. La muscovita posee resistencia química: no la produce efecto alguno ningún disolvente ni álcalis. Los ácidos sulfúrico y clorhídrico solamente descomponen la muscovita durante el calentamiento.

Las características fundamentales de la muscovita son: densidad 2700...3000 kg/m³; higroscopicidad 1,3...4,5 %; $\rho_v = 10^{12}...10^{14} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$; $\epsilon = 6...8$; $\text{tg } \delta = 0,0003...0,0005$; $E_r = 120...190 \text{ MV/m}$ (cuando el espesor de las hojitas es de 0,01 mm). Con el aumento del espesor la rigidez eléctrica de la mica disminuye.

La muscovita no cambia sus propiedades hasta la temperatura de 500 °C. Al superar esta temperatura comienza

a desprenderse de la mica el agua de constitución química. Como resultado de esto las hojitas de mica se hinchan, es decir, aumentan su espesor. Con ello empeoran bruscamente las características eléctricas y otras. La temperatura de fusión de la muscovita es igual a 1260...1300 °C.

La flogopita es una mica potásico-magnesiana ($K_2O \times 6MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot H_2O$). El color de los cristales de la flogopita varía desde el negro hasta el ambarino. Las hojitas finas (0,006...0,01 mm) de mica flogopita son semitransparentes. Estas tienen un menor esfuerzo de rotura durante la tracción y son menos elásticas en comparación con la mica muscovita. La relativamente pequeña resistencia a la abrasión ha permitido utilizar la flogopita en la producción de materiales en hojas encolados: micanitas para colectores. De estos materiales se estampan juntas para el aislamiento de las láminas de cobre en los colectores de las máquinas eléctricas. Estando durante el trabajo bajo la acción abrasiva de las escobillas las juntas aislantes de flogopita se desgastan en un mismo grado que las láminas de cobre. Esto garantiza un trabajo normal del colector.

La flogopita, en comparación con la muscovita, posee menor resistencia química. Reacciona con los ácidos, pero los álcalis no actúan sobre ella.

Las características fundamentales de la flogopita son: densidad 2700...2800 kg/m³; higroscopicidad 1,5...5,2%; $\rho_v = 10^{11}...10^{13} \Omega \cdot m$; $\epsilon = 5...7$; $\operatorname{tg} \delta = 0,002...0,008$; $E_r = 95...180$ MV/m (cuando el espesor de las hojitas es de 0,01 mm).

La flogopita no cambia sus características hasta la temperatura de 800 °C. Al sobrepasar esta temperatura comienza el hinchamiento de las hojitas de flogopita, con la pérdida de sus características eléctricas y propiedades mecánicas originales. En ciertas variedades de la mica flogopita con elevado contenido de agua (flogopita hidratizada) el empeoramiento brusco de las propiedades se inicia desde la temperatura 200...250 °C. La temperatura de fusión de la mica flogopita es igual a 1270...1330 °C.

Se debe señalar que todas las especies de mica absorben la humedad, fundamentalmente, por los planos

de clivaje de las hojitas de mica. La higroscopicidad de la mica es de 1,3 a 5,5%. La mica yace en el suelo conjuntamente con otros minerales (pegmatita, cuarzo y otros). Los cristales de mica extraídos se someten a una purificación y después se escinden en láminas, denominadas selecciones de mica. Desmenuzando las chapas-selecciones de mica se obtiene la mica exfoliada. Ésta son hojitas de mica de 10 a 45 μm de espesor que tienen la forma del contorno que corresponde al contorno de la selección. La mica exfoliada se obtiene por el método de la desintegración de las correspondientes selecciones de mica: muscovita y flogopita. Con este método se pueden obtener hojitas de espesor homogéneo. Según sea el área del rectángulo que se puede inscribir en el contorno de la hojita se distinguen nueve dimensiones de la mica exfoliada (tabla 9).

Tabla 9. *Surtido de la mica exfoliada*

Número de la mica exfoliada	50	40	30	20	15	10	6	4	0,5
Área del rectángulo inscrito, en cm^2	50... 60	40... 50	30... 40	20... 30	15... 20	10... 15	6... 10	4...6	0,5...4

La mica exfoliada se utiliza para la fabricación de variedades importantes de aislamiento (de ranura y otras) en los turbogeneradores, generadores hidroeléctricos, electromotores de tracción y en otras máquinas eléctricas). Debido al área pequeña de las hojitas de mica exfoliada ésta se emplea en forma de materiales micáceos encolados: micanitas y cintas de mica.

Se produce una mica sintética, la **fluoroflogopita** que posee buena capacidad de desintegración en hojitas totalmente transparentes. En comparación con las micas naturales la fluoroflogopita posee una mayor resistencia al calor (hasta 1000 °C), menor higroscopicidad

(0,5...2,0 %) y un nivel más elevado de las características eléctricas. Así, en la mica sintética la resistividad de volumen es en 15...20 veces y la rigidez eléctrica, en 1,5 veces mayores, y la tangente del ángulo de pérdidas dieléctricas en 2 veces menor que en la mica natural. Las ramas principales de aplicación de la fluoroflogopita son el aislamiento interno en los tubos electrónicos y el aislamiento resistente al calor en las máquinas eléctricas especiales.

Las micanitas son materiales duros o flexibles en chapas que se obtienen pegando las hojitas de mica exfoliada con ayuda de resinas de aparejo (de goma laca, gliptálica y otras) o de barnices sobre la base de estas resinas. Para ello las hojitas de mica natural exfoliada se distribuyen en las mesas en una capa, se rocía ésta con barniz de aparejo, se superpone la segunda capa y también se rocía con barniz, y así sucesivamente, hasta que no se forme la chapa de espesor requerido. La chapa obtenida se somete a prensado en caliente.

En la actualidad el proceso de producción de las piezas brutas de micanita en chapa está mecanizado. Todas las micanitas se designan con las respectivas marcas, que se componen de dos o tres letras y, a veces, de cifras. La primera letra en la designación de la marca indica el tipo de la micanita (K (K), para colectores; П (P), para juntas; Д (D), para moldeo; Г (G), flexible), la segunda letra señala la especie de mica que se utiliza (M, muscovita; Ф (F), flogopita; С (S), mezcla de muscovita y flogopita), la tercera letra que está en la designación de las marcas de las micanitas indica el tipo de aglutinante (Г (G), resina gliptálica; Ш (Sh), resina de goma laca; К (K), resina silicónica; П (P), resina de poliéster). La letra A que se encuentra al final de la marca indica que el contenido de aglutinante es reducido.

Por ejemplo, la marca ПМГА indica que ésta es una micanita para juntas, fabricada sobre la base de la mica muscovita y la resina gliptálica, con contenido reducido del aglutinante (5...12%). La micanita para juntas de marca ПМГ, fabricada también a base de la mica muscovita, contiene 15...20% de aglutinante (de resina gliptálica).

La micanita para colectores es un material duro en chapas fabricado mediante la pegadura de las hojitas de mica flogopita exfoliada con resinas de goma de laca o gliptálicas y el prensado doble en caliente a la presión de $(180...260) \times 10^5 \text{ N/m}^2$ y temperatura de 155°C . Las chapas prensadas de micanita para colectores se someten a rectificado, para que las divergencias del espesor no superen $\pm 0,06 \text{ mm}$. Después las chapas de micanita se recubren con barniz y de nuevo se someten a prensado, para que el material tenga una estructura compacta que garantice el trabajo seguro de los colectores de las máquinas eléctricas. Para evitar el resbalamiento de las hojitas de mica en las micanitas para colectores se introduce no más de 4 a 6% de sustancia aglutinante. La micanita para colectores se fabrica en chapas de 0,4 a 1,5 mm de espesor y superficie de $215 \times 465 \text{ mm}$ (no menos).

Las características eléctricas de la micanita para colectores son: $\rho_v = 10^{11}...10^{13} \Omega \cdot \text{m}$; $\text{tg } \delta = 0,01...0,03$; $E_r = 18...25 \text{ MV/m}$.

Con las hojitas de micanita para colectores se obtienen mediante el estampado juntas aislantes (fig. 18),

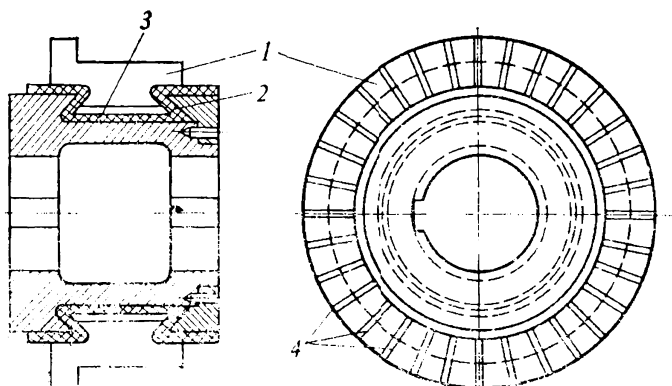


Fig. 18.

Artículos de micanitas en el colector de una máquina eléctrica:

1, láminas de cobre del colector; 2, empaquetadura de micanita para moldeo; 3, cilindro de micanita para moldeo; 4, junta de micanita para colectores

que se emplean para el aislamiento de las láminas de cobre en los colectores de las máquinas eléctricas.

La micanita para juntas representa un material duro en chapas, fabricado mediante el pegamiento de las hojitas de la mica exfoliada de muscovita, flogopita o de su mezcla, con un prensado ulterior. En calidad de sustancias aglutinantes se emplea la resina de goma laca, glicotánica o silicónica. En las micanitas para juntas la mica constituye el 80...95%, y la cantidad de aglutinante, respectivamente, el 20...5%.

La micanita para juntas se fabrica mediante un solo prensado a la temperatura de 150 °C y presión de $(35...60) \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$. La micanita se despacha en chapas de 0,15 a 5,0 mm de espesor y superficie no inferior de $550 \times 650 \text{ mm}$.

Las características eléctricas de la micanita para juntas son: $\rho_v = 10^{11}...10^{12} \Omega \cdot \text{m}$; $\text{tg } \delta = 0,03...0,06$; $E_r = 15...20 \text{ MV/m}$.

Con la micanita para juntas se fabrican diversas juntas electroaislantes para las máquinas y aparatos eléctricos.

La micanita para moldeo es un material en chapa que se obtiene mediante el pegamiento de las hojitas de mica exfoliada de muscovita, flogopita o de su mezcla con resina glicotánica, de goma laca o silicónica. Las piezas prefabricadas de micanita para moldeo se someten a un solo prensado a la presión de $(5...10) \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ a la temperatura de 155 °C. En comparación con las micanitas para colectores y juntas la micanita para moldeo tiene una estructura algo mullida. Esto es necesario para la fabricación (con prensado en caliente) con la micanita para moldeo de piezas electroaislantes de forma complicada (véase fig. 18). En las micanitas para moldeo el contenido de mica es de 80 a 95%, y el de aglutinante desde 20 hasta 5%.

Siendo dura a la temperatura ambiente la micanita para moldeo posee la capacidad de moldearse en estado caliente y conservar la forma dada. La micanita para moldeo se fabrica en chapas de 0,1 a 2,0 mm de espesor y más, y superficie (no menor) de $550 \times 650 \text{ mm}$.

Las características eléctricas de la micanita para mol-

deo son: $\rho_v = 10^{11} \dots 10^{12} \Omega \cdot m$; $\text{tg } \delta = 0,05 \dots 0,09$; $E_r = 12 \dots 18 \text{ MV/m}$. Las micanitas de 0,15 a 0,25 mm de espesor, fabricadas a base de la mica muscovita, tienen características eléctricas de mayores valores.

La micanita flexible es un material en chapa que se obtiene mediante el pegamiento de la mica exfoliada (muscovita o flogopita) con ayuda de barnices oleogliptálicos que forman películas flexibles. Las micanitas flexibles se producen prensadas y no prensadas.

Para elevar la resistencia mecánica ciertas especies de micanita flexible se empapan por ambas partes con papel de micanita. El espesor de las chapas de micanita es desde 0,15 hasta 0,5 mm.

En las micanitas flexibles no empapeladas la mica constituye el 75...90 %, lo restante es aglutinante; en las micanitas empapeladas la mica constituye el 50...65 %, el aglutinante 25...10 %, y el resto lo constituye el papel.

Las micanitas flexibles se emplean como aislamiento de ranura, entre espiras y de bandaje en las máquinas eléctricas, y asimismo en calidad de distintas juntas flexibles electroaislantes. En las micanitas flexibles la capacidad de doblarse (a 20 °C) debe conservarse en el transcurso de 60 días desde el momento en que la micanita fue despachada por la fábrica productora.

La micanita flexible de vidrio se diferencia de la micanita flexible por el hecho de estar forrada por una o dos caras con tejido de lana de vidrio no alcalina, que eleva considerablemente la resistencia mecánica y la flexibilidad del material. La micanita flexible de vidrio resistente al calor (clase H) se fabrica sobre la base del aglutinante silicónico. Las micanitas de vidrio restantes se pegan con barnices oleogliptálicos o de epoxi-poliésteres. En las micanitas de vidrio se utiliza la mica flogopita.

Las micanitas flexibles de vidrio contienen de 45 a 65 % de mica, de 30 a 8 % de sustancias adherentes y lo restante es tejido de lana de vidrio. Estas micanitas tienen un espesor de 0,20 a 0,50 mm.

Las características eléctricas de las micanitas flexibles son: $\rho_v = 10^{11} \dots 10^{12} \Omega \cdot m$; $\text{tg } \delta = 0,05 \dots 0,09$; $E_r = 12 \dots 28 \text{ MV/m}$,

Todas las especies de micanitas a base de aglutinante silicónico pueden trabajar durante largo tiempo a 180 °C (clase H), las micanitas sobre la base de composiciones de poliésteras y de epoxi pueden trabajar durante largo tiempo a 155 °C, mientras que las micanitas a base de resinas de goma laca y gliptálicas a temperaturas no superiores a 130 °C.

El **micafolio** es un material en rollos o chapas compuesto de una o varias capas de mica exfoliada (muscovita o flogopita) pegadas en un papel opaco para guía de teléfono de 0,05 mm de espesor. En calidad de aglutinante se emplean los barnices gliptálico, óleo-gliptálico y otros.

El micafolio se fabrica en rollos con anchura no menor que 500 mm y en chapas con dimensiones de 500 × 1000 mm y 0,15, 0,20 y 0,30 mm de espesor. El micafolio contiene de 45 a 65% (en masa) de mica, de 30 a 12% de sustancias adherentes, y el resto son papel y sustancias volátiles. El micafolio, igual que la micanita para moldeo, puede moldearse en estado caliente. Con el micafolio se fabrican (con prensado en caliente) tubos para el aislamiento de tornillos y espárragos, camisas para el aislamiento de ranura de los arrollamientos y otros artículos perfilados.

Todas las especies de micafolio pertenecen a la clase B por su resistencia al calor, es decir, pueden trabajar a temperaturas de hasta 130 °C.

Las características fundamentales del micafolio son: $\sigma_t = (1,5...3,2) \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$; $\rho_v = 10^{10}...10^{11} \Omega \cdot \text{m}$; $E_r = 13...20 \text{ MV/m}$.

La **cinta de mica** es un material en rollos, flexible a la temperatura ambiente. La cinta de mica se obtiene pegando en una capa las hojitas de mica exfoliada (con solapamiento) en un papel fino de mica (0,02...0,03 mm) o en un tejido de lana de vidrio. El material que se obtiene tiene un espesor de 0,08 mm. La cinta de mica con espesor de 0,10; 0,13; 0,17 y 0,21 mm se empapela con papel de mica o tejido de lana de vidrio por dos lados. En calidad de barnices se emplean los oleo-bituminosos (negros) u óleo-gliptálicos (claros), y en la producción de cinta de mica de tejido de lana de vidrio se emplean los barnices silicónicos resistentes al calor,

La cinta de mica contiene (en masa) 45...60% de mica; 25...20% de papel; 20...15% de sustancia adherente; el resto son sustancias volátiles.

La cinta de mica se despacha en rollos de 400 mm de anchura o en carretes de 10, 15, 20, 23, 25, 30 y 35 mm de ancho. Para conservar la flexibilidad la cinta de mica se guarda en embalaje hermético cerrado (cajas metálicas).

La cinta de mica se emplea en calidad de aislamiento principal de los arrollamientos (almas) en los generadores y motores eléctricos de alta tensión. Las cintas de mica sobre la base de aglutinante silicónico con soporte de tejido de lana de vidrio poseen una resistencia máxima al calor.

Las características eléctricas de la cinta de mica son: $\sigma_t = (1,8...3,5) \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$; $\rho_v = 10^{10}...10^{12} \Omega \cdot \text{m}$; $E_r = 10...22 \text{ MV/m}$.

§ 25. Materiales de los desperdicios de mica aglomerados y en capas

Durante el laboreo de la mica natural y fabricación con ella de materiales electroaislantes se origina cerca del 90% de diversos desperdicios. Entre ellos constituyen un gran porcentaje los desechos finos de mica: el scrap. Con el scrap limpiado se fabrica el papel de mica (de polvo de mica), con el que se obtienen materiales electroaislantes duros o flexibles: aglomerados de desperdicios de mica. Para la fabricación de mica aglomerada se utilizan los desperdicios de la mica muscovita.

Con el fin de mejorar las propiedades eléctricas y mecánicas de los papeles de mica aglomerada en la papilla micácea se introducen diferentes aglutinantes (resinas silicónicas, gliptálicas y otras).

Con el papel de mica aglomerada se fabrican los mismos materiales electroaislantes que se fabrican con la mica exfoliada. Sin embargo, los materiales de mica aglomerada poseen una mayor uniformidad de espesor, mayor homogeneidad y características eléctricas algo más elevadas. En calidad de defectos de los materiales aglomerados de desperdicios de mica se deben señalar la menor resistencia mecánica y la resistencia a la humedad,

algo reducida en comparación con las micanitas.

Entre los materiales aglomerados de desperdicios de mica han obtenido mayor utilización las cintas de este material y con mezcla de fibra de vidrio, que se caracterizan por la gran homogeneidad de sus propiedades en comparación con la cinta de mica. Las cintas de aglomerado de desperdicios de mica con mezcla de fibra de vidrio a base de aglutinante silicónico poseen una elevada resistencia al calor. Junto con éstos encuentran aplicación los materiales de esta clase especiales para colectores, juntas y de tipo flexible. Las características eléctricas de los materiales aglomerados de desperdicios de mica se encuentran al mismo nivel que las de los correspondientes materiales de mica exfoliada. Las cintas de estos materiales con mezcla de fibra de vidrio se emplean en lugar de la cinta de mica para el aislamiento de las espiras y de los cuerpos en las máquinas eléctricas. Los materiales aglomerados de desperdicios de mica pertenecen por su resistencia al calor a las clases B, F y H, según sea el aglutinante que se emplea.

El primer intento de emplear los desperdicios de mica condujo a la creación de materiales electroaislantes duros, en chapa y en cintas flexibles, a base de los papeles de aglomerados de desperdicios de mica. Estos materiales sustituyeron los pegados con mica exfoliada. Pero el papel de desperdicios aglomerados de mica, que es la base de todos los materiales de este tipo, posee pequeña resistencia mecánica. La búsqueda de un soporte más resistente para los nuevos materiales electroaislantes, fabricados con los desperdicios de mica, condujeron a la elaboración de papeles de desperdicios de mica en capas. Estos últimos poseen una resistencia mecánica más elevada en comparación con los papeles de desperdicios de mica aglomerados.

El papel de desperdicios de mica en capas se obtiene también mediante el desmenuzamiento de los desperdicios de mica, pero sin emplear los tratamientos a elevada temperatura (800 °C) y químico que se emplean en la producción de papel de desperdicios de mica aglomerados. Esto permite a las partículas de mica conservar en mayor grado la capacidad de adherirse unas a otras. En

este caso se origina el papel de mica en capas, cuya resistencia es considerablemente superior a la del papel de desperdicios de mica aglomerados.

Ambos tipos de papeles fabricados con los desechos de la mica poseen porosidad y, por esto, el aislamiento fabricado con estos materiales se utiliza después de su impregnación con barnices electroaislantes o con compuestos. Los barnices silicónicos son las sustancias impregnantes y aglutinantes de mayor perspectiva, pues garantizan la obtención de materiales electroaislantes resistentes al calor (cintas y otros).

El empleo de compuestos impregnantes y ligantes, así como soportes de tejido de fibra de vidrio permite obtener el mismo surtido de materiales electroaislantes que se obtiene con la mica exfoliada. Éstos son los plásticos de mica para colectores, juntas, moldes y flexibles, y asimismo el plástico de mica folio y la cinta de plástico de mica con lana de vidrio, y otros materiales compuestos a base del papel de desperdicios de mica en capas. La práctica de utilización de estos materiales en calidad de aislamientos entre espiras, de espiras y de ranura de las máquinas eléctricas ha demostrado que los materiales fabricados a base de los desperdicios de mica tienen un espesor más uniforme y que los valores de sus características eléctricas son mayores en comparación con muchos materiales de mica exfoliada pegada. La utilización amplia de dichos materiales en la producción electrotécnica tiene un gran valor técnico-económico.

§ 26. Materiales electrocerámicos

Los materiales electrocerámicos son sustancias sólidas semejantes a piedras que solamente se pueden labrar con abrasivos (carborundo y otros). Todos los materiales electrocerámicos, según su destino, se dividen en tres grupos: cerámica de aisladores, de condensadores y de ferroeléctricos*.

Los materiales electrocerámicos no son higroscópicos y son resistentes a los cambios atmosféricos. Uno de los

* Las propiedades ferroeléctricas fueron descubiertas por primera vez en la sal de Seignette.

materiales electrocerámicos más ampliamente utilizado es la **porcelana eléctrica***. De ésta se fabrican diversos tipos de aisladores de alta y baja presiones (fig. 19).

La masa original de porcelana eléctrica se compone de sustancias arcillosas (42—50%), cuarzo (20—25%), feldespato calizo (22—30%) y desechos de porcelana triturados (5—8%). Para la fabricación de aisladores con

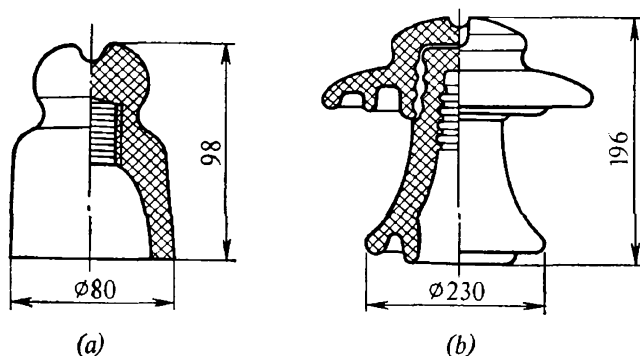


Fig. 19.
Aisladores rígidos de porcelana:
a, de baja tensión; b, de alta tensión

masa de molde en los componentes triturados se introduce un 20 ... 22% de agua. Después de esto, con el fin de extraer las inclusiones de aire, la masa pastosa de porcelana se somete a un tratamiento al vacío.

La masa obtenida en la vacuoprensa representa un cilindro monolítico que, al salir del troquel, se corta en pedazos de longitud dada (preformas) con los que se fabrican (se forman) los distintos tipos de aisladores.

Los aisladores se forman prensando las preformas en moldes de yeso o acero o con otros métodos. Los aisladores extraídos de los moldes ingresan en los tornos, donde se les dan los contornos y dimensiones definitivos. Los aisladores torneados tienen una humedad de 16 a 18%. Luego los aisladores se envían a los secadores, donde

* La elaboración y creación de la porcelana nacional (en 1746) pertenece a D. I. Vinográdov.

la humedad se reduce hasta 0,1...2%. Debido a la deshidratación del artículo, en éste tiene lugar un encogimiento aéreo: disminuye el volumen del mismo.

Los artículos de porcelana secados se someten a vi-
driado con una suspensión de barniz (esmalte). La composición del barniz se diferencia de la composición de la masa líquida de porcelana por tener un mayor contenido de componentes originadores del vidrio (cuarzo, feldespato, dolomita y otros). En los esmaltes de color, además, se introducen colorantes: cromita, pirolusita y otros.

En el proceso de cochura de los artículos de porcelana eléctrica la capa de esmalte se derrite, creando en la superficie de los artículos un recubrimiento vítreo uniforme. El esmalte eleva la resistencia mecánica de los aisladores y hace ser resistentes a la humedad y a las contaminaciones atmosféricas. Los esmaltes de color sirven también para el camuflaje de los aisladores.

El tratamiento térmico de los aisladores, la cochura, se efectúa en hornos continuos de túnel. Estos hornos se caracterizan por elevado rendimiento, ya que la cochura transcurre en cadena continua. Los aisladores secados y cubiertos de una suspensión de esmalte se desplazan en el túnel del horno en vagonetas especiales. Los aisladores pasan sucesivamente las zonas de calentamiento, cochura y enfriamiento en un horno con temperaturas dadas. A la salida del horno estos aisladores representan artículos acabados de porcelana eléctrica. Durante la cochura de los artículos de porcelana eléctrica la llama y los gases no deben actuar directamente sobre ellos, por lo que los aisladores y demás artículos se colocan en cápsulas refractarias, que son cajas redondas fabricadas de una masa de cerámica refractaria.

Los artículos electrocerámicos obtenidos después de la cochura se someten a ensayos mecánicos y eléctricos. Con esto los artículos defectuosos se desechan.

Si se examina la estructura de la porcelana con ayuda del microscopio se verá que la porcelana consta de cristales de mullita $2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ de forma de agujas, situados caóticamente unos respecto a los otros. Los intervalos entre estos cristales están rellenos de vidrio, en el que parcialmente se han disuelto los granos de cuarzo. La

combinación de la fase cristalina y la vítrea garantiza suficiente resistencia mecánica y eléctrica de la porcelana y la ausencia de higroscopicidad. Las características fundamentales de la porcelana eléctrica se exponen en la tabla 10.

La esteatita es otro material de la cerámica eléctrica. Este se diferencia de la porcelana eléctrica por tener una mayor resistencia mecánica y mejores características eléctricas. Los artículos electroaislantes de esteatita pueden trabajar a una temperatura de hasta 250 °C sin que varíen considerablemente sus características eléctricas. Por el contrario, en los artículos de porcelana electrotécnica, comenzando desde la temperatura de 100 °C y más, se observa un empeoramiento brusco de las características eléctricas.

La esteatita es un material más caro en comparación con la porcelana eléctrica, ya que para su preparación se utiliza una materia prima de precio más alto.

Las masas originales de esteatita se preparan a base de un mineral natural, el talco ($3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) y del carbonato de bario BaCO_3 o del carbonato de calcio CaCO_3 . Para garantizar la plasticidad, en las masas de esteatita se introducen de 15 a 20% de sustancias arcillosas (arcillas bentoníticas y otras arcillas). Para las esteatitas se utilizan las clases más puras de piedras de talco natural, con un contenido de óxidos ferrosos no superior a 0,5%. El proceso de preparación de las masas originales plásticas de esteatita no se diferencia de la preparación de las masas de porcelana eléctrica.

Con la masa plástica de esteatita se fabrican aisladores de esteatita y artículos electroaislantes con el método de prensado en moldes de yeso.

El procedimiento de moldeo de los artículos de esteatita a presión a base del vehículo de parafina (ligadura de parafina) es el más divulgado. Según esta tecnología primero se obtiene la denominada aglomeración de esteatita. Ésta son partículas de la masa de esteatita que sufrió la cochura preventiva en el horno y que después se trituran. El polvo limpio se mete en un molino de bolas con calentamiento eléctrico. En este mismo molino se cargan la parafina (8...16%), el ácido oleico (0,6...0,8%)

y los cuerpos frotadores (bolas de esteatita). El molino se calienta hasta 90 °C y, al cerrar la escotilla, se pone en marcha. En este caso tiene lugar una molienda fina del polvo de esteatita y su mezcla con la parafina fundida. Generalmente en este mismo molino de bolas la masa de

Tabla 10. *Características fundamentales de los materiales electrocera*

Material	Densidad, kg/m ³	Esfuerzo de rotura durante la tracción, N/m ²	Esfuerzo de rotura durante la flexión, N/m ²
Porcelana eléctrica	2300...2500	(300...500) · 10 ⁵	(600...1000) · 10 ⁵
Esteatita	2800...3000	(500...700) · 10 ⁵	(1400...1700) · 10 ⁵

* Las características mecánicas de las muestras esmaltadas son, por tér-

esteatita para moldear se somete a rarefacción con el fin de mejorar sus cualidades de moldeo. La masa preparada para moldear ingresa en los depósitos de trabajo de los aparatos de fundición. Desde allí, bajo una presión de (3...8) · 10⁵ Pa, esta masa rellena los moldes de acero.

Con el método de moldeo por inyección se fabrican artículos de perfil complicado (fig. 20) para los aparatos e instrumentos eléctricos.

Para la separación de la parafina en los artículos moldeados, éstos se meten en cápsulas refractarias. El espacio entre los artículos moldeados en las cápsulas se rellena con polvo de alúmina. Las cápsulas con los artículos se calientan paulatinamente hasta 800 °C y se mantienen a esta temperatura. La parafina se separa de los artículos moldeados y se filtra en el polvo de alúmina. Una vez separada la parafina, los artículos se someten a cochura en hornos con temperatura final de 1280 a 1350 °C.

Los artículos de esteatita obtenidos con el método de moldeo por inyección a presión tienen una superficie lisa y densa. Los artículos fabricados de masa para moldear, en la que previamente se introducen minerales tostados que componen la masa original de esteatita (aglomeración

de esteatita), tienen un encogimiento volumétrico mínimo (5%). La base de la esteatita la componen los cristales de clinoestatita ($\text{MgO} \times \text{SiO}_2$). Su contenido en la esteatita alcanza cerca del 70 %, y el 30 % restante lo compone el vidrio.

*micos (muestras no esmaltadas)**

Resiliencia, kJ/m ²	Resistividad de volumen, $\Omega \cdot \text{m}$	Permitividad	Tangente del ángulo de pérdidas dieléctricas (a 50 Hz)	Rigidez eléctrica, MV/m
1,8...2 3...4	$10^{11} \dots 10^{12}$ $10^{13} \dots 10^{14}$	6...7 7...8	0,025...0,03 0,0006...0,004	30...32 35...40

mino medio, mayores en un 15...20%.

En la tabla 10 se exponen las características fundamentales de la porcelana eléctrica y de la esteatita*.

Los materiales cerámicos para condensadores se diferencian de los materiales cerámicos para aisladores por tener permitividad de mayor magnitud ($\epsilon = 14 \dots 250$). Esto permite fabricar condensadores cerámicos de gran capacidad y dimensiones relativamente pequeñas. Los condensadores cerámicos no poseen higroscopicidad y, por consiguiente, no necesitan envolturas y cuerpos protectores, necesarios para los condensadores de papel y de mica. La tecnología de fabricación de los condensadores cerámicos es considerablemente más simple en comparación con la producción de condensadores de papel y de mica.

Los condensadores cerámicos (fig. 21) se fabrican con los métodos de la tecnología cerámica: con fundición en moldes de yeso o acero, mediante el prensado, y otros. Los condensadores fabricados con uno u otro procedimien-

* Respecto a los tipos, dimensiones y características de los aisladores véase: *Nikulín N. V.* «Prontuario del joven eléctrico respecto a materiales y artículos electrotécnicos» (en ruso).

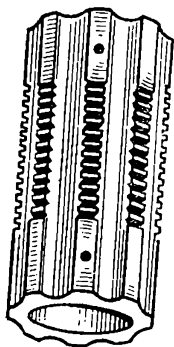


Fig. 20.
Armazón de la bobina de un transformador, obtenido mediante el moldeo por inyección con masa de esteatita para moldear

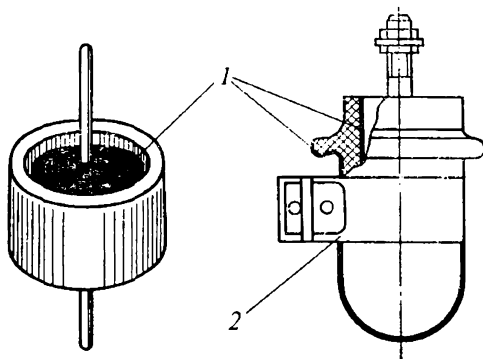


Fig. 21.
Condensadores de tonelete y de olla:
1, electrodos; 2, collar de latón

to se someten a cochura en hornos con temperatura final de 1450 a 1700 °C. Como resultado de ello se obtienen condensadores inhumedecibles, mecánicamente resistentes. En la superficie de los condensadores cerámicos se colocan (al fuego) electrodos macizos 1 de plata con espesor de 15 a 20 μm , a los que se sueldan los conductores de cobre. Para proteger los electrodos contra la corrosión y excluir la posibilidad de cortocircuito toda la superficie de los condensadores cerámicos se recubre con una capa de esmalte resistente a la humedad.

Los materiales cerámicos para condensadores deben poseer grandes valores de permitividad. Para esto en ellos deben transcurrir intensamente los procesos de polarización. Al mismo tiempo, las características eléctricas restantes de los materiales para condensadores deben tener un alto nivel: $\rho_v = 10^{12} \dots 10^{13} \Omega \cdot \text{m}$; $\text{tg } \delta = 0,005$; $E_r = 20 \dots 25 \text{ MV/m}$. Satisfacen esta exigencia los materiales a base de los compuestos del dióxido de titanio TiO_2 , del dióxido de estaño SnO_2 o del dióxido de

zirconio ZrO_2 , por un lado, y de los óxidos de los metales alcalinos o alcalinotérreos (CaO ; MgO ; SrO , y otros), por otro lado. Para obtener materiales para condensadores estos óxidos pulverulentos se mezclan unos con otros en correlación determinada y se trituran minuciosamente. En ciertas masas originales para condensadores, con el fin de comunicarlas plasticidad, se introduce una pequeña cantidad de sustancias arcillosas. Pero esto provoca un empeoramiento de las características eléctricas de los condensadores cerámicos.

Los materiales cerámicos para condensadores a base del dióxido de titanio se denominan **titanatos**, por ejemplo, titanato de magnesio MgTiO_3 . Los materiales cerámicos a base del dióxido de estaño se denominan **estannatos**, por ejemplo, estannato de calcio CaSnO_3 . Los materiales cerámicos a base del dióxido de zirconio se denominan **zirconatos**, por ejemplo, zirconato de bario BaZrO_3 y otros.

Los valores de la permitividad, así como la magnitud y el signo del coeficiente de temperatura de la permitividad, quedan determinados por la composición y estructura del material.

Las características fundamentales de algunos materiales cerámicos para condensadores se exponen en la tabla 11.

Tabla 11. Características fundamentales de los materiales cerámicos para condensadores*

Base cristalina de la cerámica	Fórmula química de base cristalina	Permitividad	Coefficiente de temperatura de la permitividad, $1/^\circ\text{C}$	Esfuerzo de rotura durante la flexión estática, N/m^2
Titanato de magnesio	MgTiO_3	14	$+70 \cdot 10^{-6}$	$1200 \cdot 10^5$
Titanato de calcio	CaTiO_3	150	$-1500 \cdot 10^{-6}$	$1500 \cdot 10^5$
Estannato de calcio	CaSnO_3	16	$+110 \cdot 10^{-6}$	$900 \cdot 10^5$
Zirconato de bario	BaZrO_3	38	$-350 \cdot 10^{-6}$	$800 \cdot 10^5$

* La densidad de los materiales cerámicos para condensadores se encuentra en los límites de 3200 a 4800 kg/m^3 .

Los *materiales ferrocerámicos* (ferrocerámica) pertenecen al grupo de dieléctricos denominados **ferroeléctricos**. A diferencia de los materiales dieléctricos antes estudiados los ferroeléctricos poseen ciertas propiedades típicas. Así, en los ferroeléctricos se observan valores anómalamente grandes de la permitividad, lo que permite emplearlos en calidad de sensores de temperatura durante la medición de ésta con métodos eléctricos. La permitividad grande de los ferroeléctricos permite fabricar con ellos condensadores eléctricos de tamaño reducido y gran capacidad. Los valores de la permitividad de los ferroeléctricos aumentan en alto grado con la elevación de la tensión aplicada, lo que no se observa en los dieléctricos ordinarios. Esta propiedad típica de los ferroeléctricos se utiliza en los amplificadores dieléctricos.

Si se comprime o se estira una placa de ferroeléctrico aplicando a sus extremos esfuerzos mecánicos, entonces en las superficies opuestas de la placa se inducen cargas eléctricas de distintos signos. Como resultado la placa de ferroeléctrico se convierte en fuente de fuerza electromotriz. Este fenómeno se denomina «piezoeffecto directo». Dicho efecto permite emplear los ferroeléctricos en los captadores eléctricos de presión.

Si aplicamos a la placa de ferroeléctrico una tensión variable entonces la placa comenzará a vibrar con aquella frecuencia con la que varía la tensión alterna aplicada. Este fenómeno se denomina «piezoeffecto inverso». Los elementos piezoeléctricos fabricados de ferroeléctricos sirven de fuente de oscilaciones de alta frecuencia.

Hasta hace poco el único ferroeléctrico era la sal de Seignette (o también llamada de la Rochela), cuya fórmula es $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Esta sal es una sustancia cristalina que se disuelve en el agua y se funde a 55°C , hecho que dificultaba su utilización.

En el año 1943 fue sintetizado el primer ferroeléctrico cerámico, el titanato de bario (BaTiO_3)*. Actualmente se han creado una gran cantidad de ferroeléctricos cerámicos: el titanato de cadmio (CdTiO_3), el zirconato de plo-

* El descubrimiento e investigación de las propiedades ferroeléctricas del titanato de bario pertenece al sabio soviético, académico B. M. Vul.

mo (PbZrO_3) y otros. Los ferroeléctricos cerámicos no absorben la humedad, no se disuelven en el agua y pueden trabajar en un intervalo de temperaturas suficientemente amplio.

Todos los ferroeléctricos poseen propiedades típicas para ellos solamente hasta una temperatura determinada. Así, el titanato de bario tiene propiedades ferroeléctricas hasta la temperatura de 120°C , y el zirconato de plomo, hasta 461°C . Al elevar estas temperaturas* los ferroeléctricos pierden sus propiedades típicas y se convierten en dieléctricos ordinarios.

§ 27. Vidrios silíceos (inorgánicos)

El vidrio inorgánico es un material barato ya que se fabrica de sustancias muy accesibles: arena de cuarzo SiO_2 , sosa Na_2CO_3 , dolomita $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$, creta CaCO_3 y algunos otros componentes. La mezcla de estas sustancias, tomadas en determinada correlación, se denomina *carga*. La carga se introduce en el horno de fundir vidrio y, al calentarla hasta $1350\text{--}1600^\circ\text{C}$ se funde, formando una masa líquida de vidrio de la que se fabrican distintos artículos.

La sustancia principal originadora del vidrio es la arena de cuarzo, que contiene 98% SiO_2 . Prácticamente el vidrio se puede obtener teniendo solamente arena de cuarzo, pero ésta se puede fundir únicamente a una temperatura muy elevada (de casi 2000°C). Para ello se requiere tener hornos muy caros y otros equipos complicados. Es verdad que los vidrios de cuarzo puro poseen una serie de propiedades valiosas: características eléctricas muy elevadas, resistencia a la humedad (resistencia hidrolítica) y un coeficiente de temperatura de dilatación lineal muy pequeño ($5 \cdot 10^{-7} \text{ } 1/^\circ\text{C}$). Esto determina la termorresistencia extraordinariamente elevada del vidrio de cuarzo. Así, los artículos de vidrio de cuarzo, calentados hasta la calda y sumergidos en agua fría no se agrietan.

* Estas temperaturas límites se denominan temperaturas ferroeléctricas de Curie.

Algunos artículos electroaislantes termorresistentes (aisladores pequeños) se fabrican de vidrio puro de cuarzo.

Las características fundamentales del vidrio de cuarzo son: densidad, 2200 kg/m^3 ; $\rho_v = 10^{14} \Omega \cdot \text{m}$; $\epsilon = 3,8$; $\text{tg } \delta = 0,001$; $E_r = 35 \dots 44 \text{ MV/m}$.

Para la obtención de las variedades restantes de vidrio se compone una carga en la que, además de la arena de cuarzo, existen sustancias que disminuyen la temperatura de su fusión. A estas sustancias pertenecen: la sosa calcinada, la creta, la dolomita y algunas otras.

En la composición de la carga se introducen también sustancias que precaven la cristalización de los vidrios: alúmina Al_2O_3 , anhídrido bórico B_2O_3 y otros.

Durante el calentamiento de la carga al principio se evapora la humedad. Los gases se volatizan a la atmósfera y los óxidos que quedaron de sodio, potasio, calcio y otros entran en reacciones químicas con el sílice (SiO_2) y forman compuestos denominados *silicatos*. De aquí que los vidrios inorgánicos se llaman silíceos.

A la temperatura de 1350 a 1600°C los silicatos se funden, originando una masa viscosa de vidrio con la que se fabrican diversos artículos. Así, mediante el soplado en moldes metálicos se obtienen ampollas para bombillas, y con el prensado se obtienen aisladores de vidrio y otros artículos.

Según su composición química todos los vidrios silíceos se pueden clasificar en cuatro grupos: alcalinos, alcalinos con contenido de óxidos pesados, bajos en álcalis e inálcalinos.

Los vidrios alcalinos son relativamente fusibles (1350°C), contienen una gran cantidad de óxidos alcalinos, fundamentalmente, Na_2O y, parcialmente, K_2O . A este grupo de vidrios pertenecen el de ventanas, el de vasija y el de botellas. Los vidrios alcalinos poseen valores reducidos de las características eléctricas y tienen un coeficiente de temperatura de dilatación lineal grande, hecho que determina su baja termorresistencia.

Los vidrios alcalinos con contenido de óxidos pesados poseen valores elevados de las características eléctricas. A este grupo pertenecen los flint-glass (contienen PbO) y los vidrios corona (crown-glass), que contienen BaO .

Estos se utilizan para la fabricación de condensadores, aisladores y otros artículos.

Los vidrios bajos en álcalis contienen no más del 5% de óxidos alcalinos. Con estos vidrios se fabrican aisladores de vidrio de alta tensión.

Los vidrios inálcalinos o bien no contienen absolutamente óxidos alcalinos (como, por ejemplo, el vidrio de cuarzo), o bien el contenido de éstos no supera el 2%. Con estos vidrios se fabrica la fibra para el tejido electroatlante de lana de vidrio. Estos vidrios se distinguen por la relativamente elevada temperatura de fusión. Para reducir ésta en la composición de la carga se introduce anhídrido bórico (hasta 10%).

Hasta el último tiempo todos los aisladores se fabricaban de porcelana eléctrica. Los intentos de emplear para este fin el vidrio fracasaban debido a las insuficientes resistencias mecánica y térmica de los aisladores de vidrio.

Actualmente se han elaborado la composición del vidrio bajo en álcali para aisladores y la tecnología de fabricación de aisladores con vidrio templado. De acuerdo con esta tecnología la masa de vidrio, que ingresa del horno de balsa, se lleva al molde de fundición de la prensa automática. Con ayuda del macho tiene lugar el prensado del aislador. Luego el aislador caliente se saca del molde y se sopla uniformemente por todos los lados con aire frío, que ingresa a través de las toberas.

La resistencia mecánica de los aisladores templados de vidrio es en 2...3 veces superior a la de los no templados, y mayor que la de los aisladores de porcelana. Por esto las dimensiones de los aisladores templados de vidrio son menores (en 10...20%) en comparación con los de porcelana. Las características eléctricas y mecánicas del vidrio bajo en álcali se exponen en la tabla 12.

Los aisladores de pequeño tamaño (de espiga para tensión de hasta 10 kV y algunos otros) se fabrican de vidrio recocido y no de vidrio templado. En este caso los aisladores prensados en las prensas automáticas se recuecen en hornos. Con esto la temperatura de los aisladores se eleva lentamente, y luego se baja lentamente hasta la temperatura ambiente.

Tabla 12. Características fundamentales del vidrio bajo en álcali

Característica	Vidrio bajo en álcali
Densidad, kg/m ³	2600
Esfuerzo de rotura durante la flexión estática, N/m ²	2500 · 10 ⁵
Resistividad de volumen, Ω · m	10 ¹²
Resistividad de superficie, Ω	10 ¹⁴
Tangente del ángulo de las pérdidas dieléctricas	0,2...0,025
Valor medio de la rigidez eléctrica, MV/m	40...45

En el proceso de recocido se eliminan todas las tensiones interiores de los aisladores de vidrio, que surgen a cuenta de su enfriamiento irregular durante el prensado.

§ 28. Dieléctricos minerales

A los dieléctricos minerales de amplia utilización pertenecen el asbesto y el cemento amiantado.

El asbesto (lino fósil) es un mineral natural cuya estructura fibrosa es su propiedad típica. Las fibras de desintegran fácilmente en filamentos aislados finos con diámetro de milésimas partes de milímetro y longitud de hasta algunos centímetros. Para la fabricación de distintos materiales electroaislantes (papel, hilo, cintas, cartón) se utiliza preponderantemente el asbesto de serpentina (amianto crisotílico) que representa el silicato de magnesio ($3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Las fibras de asbesto no absorben el agua, pero se recubren de una película ácuea. Como resultado de la higroscopicidad y de la existencia en el asbesto de diferentes impurezas las características eléctricas de los materiales de asbesto (papeles y tejidos de asbesto) no son elevadas: ($\rho_v = 10^6 \Omega \cdot \text{m}$; $E_r = 1 \dots 2 \text{ M}\Delta/\text{m}$).

Las características fundamentales del asbesto son: densidad 2500 kg/m³; $\sigma_t = (300 \dots 400) \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$.

La cualidad principal del asbesto es su elevada resistencia al calor y su incombustibilidad. A la temperatura

de casi 1450 °C el asbesto se funde. La temperatura de trabajo del asbesto es de 450 °C. A una temperatura superior a 450 °C comienza a separarse del asbesto el agua de constitución química, y sus fibras pierden la resistencia mecánica.

Con las fibras de asbesto se fabrica el papel electroaislante de 0,2 a 1 mm de espesor y los cartones de 2 a 10 mm de espesor. Para elevar la resistencia mecánica del papel de asbesto en éste se introduce una pequeña cantidad de fibras de algodón. Además, se fabrican papeles compuestos de fibras de asbesto puro, lo que les garantiza una mayor resistencia al calor. La higroscopicidad de los papeles y cartones de asbesto es de 3 a 4 % en 24 horas.

Con los hilos de asbesto se elaboran tejidos y cintas de asbesto. El espesor de los tejidos de asbesto es de 1,6 a 2,9 mm.

Las cintas de asbesto de ligamento de fibra se fabrican de tejido en el que se contiene casi 30 % de fibras de algodón, introducidas con el fin de elevar la resistencia mecánica. Estas cintas se fabrican con espesor de 0,4 a 0,6 mm y de 20 a 30 mm de anchura, y sirven para el aislamiento de las bobinas de los polos y secciones de los arrollamientos de las máquinas eléctricas de alta tensión. Aquí mismo encuentran aplicación las cintas de asbesto ferruginoso, que contiene cerca de un 8 % de óxidos ferrosos. Precisamente por esto la resistividad de volumen de estas cintas es muy reducida: $\rho_v = 10^3 \dots 10^4 \Omega \cdot m$. Estas cintas se emplean para la nivelación del campo eléctrico en las partes de los arrollamientos que salen de las ranuras del núcleo del estator, donde se observa una concentración de las líneas de fuerza del campo eléctrico, lo que puede provocar la perforación del aislamiento de los arrollamientos.

Casi todos los materiales de asbesto se emplean en estado impregnado (con barnices y compuestos). Como resultado de la impregnación se elimina la higroscopicidad de los papeles y tejidos de asbesto y se mejoran sus características eléctricas.

El cemento amiantado se fabrica de fibra de asbesto y cemento de Portland. Este cemento amiantado representa en sí una masa plástica inorgánica en la que la sustan-

cia aglutinante es el cemento de Portland, y la carga son las fibras de asbesto.

El proceso de fabricación del cemento amiantado consiste en la mezcla del asbesto desmallado con el cemento y agua. La mezcla, minuciosamente elaborada, se moldea en chapas en una máquina especial para cemento amiantado. Las chapas húmedas se prensan, secan y se cortan en tablas.

La dimensiones de las tablas fabricadas deben tener 1200 mm de longitud, 700 y 800 mm de anchura, 6, 8, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 35 y 40 mm de espesor. La resistencia mecánica de las tablas se caracteriza por la magnitud de la resiliencia, que debe ser no menor que 29...78 kJ/m².

La higroscopia de las tablas no impregnadas de cemento amiantado es grande: 15...20 %. Por esto las tablas de cemento amiantado se emplean en los dispositivos eléctricos de baja tensión (armazones de los contactores, tabiques y cámaras apagachispas en los aparatos eléctricos), fundamentalmente, en estado impregnado. La impregnación de los artículos de cemento amiantado se efectúa en parafina fundida, betún, etc. después del maquinado (taladrado, fresado y otros) y secado de los artículos a 110...120 °C.

§ 29. Conductibilidad eléctrica y disrupción de los dieléctricos sólidos

En los dieléctricos sólidos se observa, preponderantemente, la electroconductibilidad iónica. Con esto la corriente de conducción pasante representa el desplazamiento orientado de los iones libres. Estos últimos se originan como resultado de la disociación (desintegración) de las moléculas de las impurezas existentes en los dieléctricos en pequeña cantidad. Tales impurezas pueden ser: los ácidos orgánicos, los óxidos alcalinos (Na₂O; K₂O), la humedad y otras contaminaciones, cuyas moléculas se desintegran en iones.

En la corriente de conducción de los dieléctricos sólidos pueden participar también los iones del dieléctrico, es decir, los iones propios, lo que se observa a temperaturas elevadas. Debido a esto la conductividad volumétrica del

dieléctrico sólido aumenta bruscamente desde cierta temperatura (fig. 22). Así, por ejemplo, en la porcelana electrotécnica el incremento brusco de la conductividad volumétrica se observa a 100 °C y más.

Al aplicar a los dieléctricos sólidos tensiones grandes en ellos se originan también electrones libres. Conjuntamente con los iones libres los electrones participan en la corriente de conducción, que aumenta. Con esto la conductividad volumétrica del dieléctrico sólido crece.

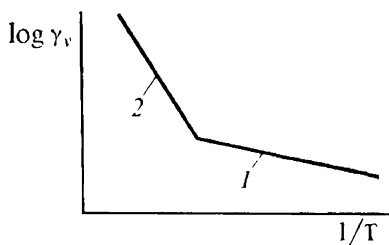


Fig. 22.

Dependencia entre la conductividad volumétrica de un dieléctrico sólido cristalino y la temperatura:

1, zona de la conductividad debida a las impurezas; 2, zona de la conductividad propia

La conductancia superficial de los dieléctricos sólidos depende del grado de humedad y contaminación de su superficie. Cuanto más húmeda y contaminada esté la superficie del dieléctrico sólido, tanto menor será la resistividad de superficie que posee este dieléctrico. Surge la necesidad de proteger la superficie de los dieléctricos sólidos con revestimientos hidrófobos, no humectables por el agua: con barnices y esmaltes.

La disrupción de los dieléctricos sólidos es un proceso eléctrico o térmico. La *disrupción eléctrica* comienza por el fenómeno de la ionización por choque, que surge durante las tensiones grandes aplicadas al dieléctrico. El proceso de ionización por choque en el dieléctrico sólido es semejante al proceso de ionización por choque en los gases*, pero transcurre a intensidades del campo eléctrico considerablemente mayores. Como resultado de las

* Véase § 8.

colisiones frecuentes de los electrones libres con las moléculas y átomos del dieléctrico se liberan nuevos electrones. Estos crean la avalancha electrónica que penetra al dieléctrico sólido en todo su espesor. A su vez el dieléctrico pierde sus propiedades electroaislantes.

En la práctica la disrupción eléctrica de los dieléctricos sólidos se encuentra raramente. Esta puede surgir

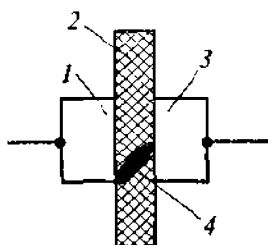


Fig. 23.
Esquema de la formación de un canal en el dieléctrico sólido durante su rotura térmica:

1, 3, electrodos metálicos;
2, dieléctrico; 4, canal de conductibilidad elevada dirección de la rotura térmica

en aquellos casos cuando las pérdidas de energía en el dieléctrico son insignificantes y se garantiza una buena evacuación del calor. Durante la disrupción eléctrica la rigidez eléctrica depende poco del espesor del dieléctrico y de su temperatura.

La *ruptura por calor* es un fenómeno de la destrucción térmica del dieléctrico: la fusión completa, atravesamiento por el canal que une dos electrodos opuestos del dieléctrico (fig. 23). Una parte del volumen del dieléctrico puede poseer una conductibilidad eléctrica elevada, como resultado de lo cual en el dieléctrico

(en el canal) puede pasar una corriente de conducción considerable. Esta corriente provocará el desprendimiento de calor y el calentamiento de este canal, lo que conducirá a la reducción de su resistencia eléctrica y, por consiguiente, al incremento de la corriente de conducción pasante. Ello, a su vez, provocará un desprendimiento complementario de calor en el canal y el recalentamiento de esta parte del volumen del dieléctrico. Durante el aumento ulterior de la tensión la corriente de conducción en el canal aumenta aún más, y el calor que ésta desprende puede provocar un atravesamiento total o una fusión completa del dieléctrico sólido.

La rigidez eléctrica durante la ruptura por calor depende en alto grado de la temperatura (véase la fig. 6) y disminuye con el aumento del espesor del dieléctrico. Al elevar la temperatura o al aumentar el espesor de.

dieléctrico sólido se dificultará la evacuación del calor de éste. Ello conducirá al recalentamiento del punto de rotura en el dieléctrico, y la destrucción térmica de éste sucederá a una menor intensidad del campo eléctrico.

Preguntas de control

1. Describa el proceso de electroconductibilidad en los dieléctricos gaseiformes.
2. ¿Cuál es la composición de los aceites minerales electroaislantes?
3. ¿Qué exigencias se presentan a los aceites electroaislantes?
4. ¿De qué factores depende la rigidez eléctrica de los dieléctricos líquidos?
5. ¿Qué es la polimerización y la policondensación?
6. ¿Cuáles son las propiedades fundamentales del policloruro de vinilo?
7. ¿Cuáles son las propiedades fundamentales de los dieléctricos orgánicos resistentes al calor?
8. ¿Qué son los barnices electroaislantes y los compuestos, en qué grupos se dividen?
9. ¿Qué representan los plásticos y de qué partes fundamentales se componen?
10. ¿Qué son los compuestos y en qué grupos se dividen?
11. ¿Qué representan los plásticos lamelados electroaislantes y dónde se emplean en la electrotécnica?
12. ¿Qué son los materiales electrocerámicos y en qué grupos se dividen?
13. ¿Qué variedades de perforaciones pueden surgir en los dieléctricos sólidos?

Capítulo III

Materiales conductores

§ 30. Materiales semiconductores de pequeña resistencia específica

Los materiales metálicos conductores son sustancias de estructura policristalina, es decir, se componen de una multitud de cristales pequeños. La mayoría de los conductores metálicos (plata, cobre, aluminio y otros) poseen una conductibilidad grande. Estos tienen una magnitud pequeña de resistencia eléctrica específica: $\rho = 0,0150...0,0283\mu\Omega \cdot m^*$. Todos ellos son, principalmente, metales puros que se destinan para la fabricación de conductores y cables**. A la par con los conductores de conductibilidad grande se requieren también materiales conductores de grande resistencia específica $\rho = 0,4...2,0\mu\Omega \cdot m$. Estos materiales conductores se destinan para la fabricación de resistencias modelos (patrones), aparatos calentadores y otros. Todos los materiales metálicos conductores poseen electroconductibilidad electrónica, es decir, la corriente de conducción en ellos es un desplazamiento orientado de los electrones libres.

Con el aumento de la temperatura la resistencia eléctrica de los conductores metálicos crece. Ello se explica por el hecho de que con el aumento de la temperatura las oscilaciones térmicas de los átomos del conductor se hacen más intensas. Entonces los electrones que se desplazan por el conductor chocan más frecuentemente con los átomos, encontrando resistencia en la ruta de su desplazamiento. Debido a esto el coeficiente de temperatura de la resistencia específica es mayor que cero en todos los conductores.

* $1\mu\Omega \cdot m = 1\Omega \cdot mm^2/m$.

** Más detalladamente respecto a los conductores de conexión, de bobinado e instalación véase: *Nikulín N. V.* «Prontuario del joven eléctrico respecto a materiales y artículos electrotécnicos» (en ruso).

Los materiales más importantes, conductores de elevada conductibilidad, son el cobre, el bronce y el aluminio.

El cobre conductor es un metal de color rojizo anaranjado, limpio de diferentes impurezas, con el punto de fusión de 1083°C y coeficiente de dilatación lineal igual a $17 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$. El cobre posee buenas propiedades mecánicas y plasticidad. Esto permite obtener del cobre un alambre de 0,03 a 0,01 mm de diámetro, y también bandas finas. El cobre conductor es muy resistente a la corrosión atmosférica, a lo que contribuye la capa fina de óxido (CuO), con la que el cobre se cubre al aire libre. La capa protectora de óxido impide la penetración ulterior del oxígeno del aire en el cobre.

La industria nacional produce cobre conductor de seis marcas y distintos grados de pureza. En el cobre las impurezas son de bismuto, antimonio, hierro, plomo, estaño, zinc, níquel, fósforo, azufre, arsénico y oxígeno. En la clase más pura de cobre conductor (marca M008) la suma de todas las impurezas no excede de 0,01 %. Para la fabricación de artículos conductores (hilos de bobinado y de conexión, y también cables) se utilizan las clases de cobre conductor con un contenido de impurezas no superior a 0,05...0,1 %. El alambre de cobre se fabrica de sección redonda y rectangular. El alambre redondo se fabrica de 0,02 a 10 mm de diámetro. El lado menor a del alambre (barras) de sección rectangular se encuentra en los límites desde 0,8 hasta 4 mm, y el lado mayor b se comprende desde 2 hasta 30 mm. El alambre de cobre se fabrica de cobre blando, es decir, recocido a una temperatura óptima (marca MM) y de cobre duro no recocido (marca MT).

En los artículos de cobre blando las características fundamentales son las siguientes: densidad 8900 kg/m^3 ; el esfuerzo de rotura a la tensión de tracción $\sigma_t = (20...27) \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$; el alargamiento relativo $e_p = 6...35 \%$; $\rho = 0,0172...0,01724 \mu\Omega \cdot \text{m}$. En los artículos de cobre duro: la densidad es de 8960 kg/m^3 ; $\sigma_t = (35...44) \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$; $e_p = 0,5...2 \%$; $\rho = 0,0177...0,0180 \mu\Omega \cdot \text{m}$.

El alambre de diámetro menor posee un esfuerzo grande de rotura durante la tracción y valores mayores de la

resistencia específica eléctrica. Para los hilos de diámetro muy pequeño (0,01 mm), destinados para trabajar a temperaturas elevadas (superiores a 300 °C), se emplea el alambre fabricado de cobre desoxidado, que se distingue por su máxima pureza. El coeficiente de temperatura de la resistencia específica $\rho = 0,0043 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ para todas las marcas de cobre.

Los broncees son aleaciones a base del cobre y se distinguen por su pequeña contracción volumétrica durante la fundición de los artículos. El encogimiento volumétrico de los broncees es de 0,6 a 0,8 %, mientras que la contracción del acero y de la fundición es de 1,5...2,5 %.

Los tipos fundamentales de bronce son aleaciones del cobre con el estaño (broncees de estaño), con el aluminio (broncees de aluminio), con el berilio (broncees de berilio) y con otros elementos de aleación. Las marcas de los broncees se designan con las letras Br (bronce) tras las cuales siguen letras y cifras que señalan los elementos de aleación y su cantidad en el bronce dado (tabla 13).

Tabla 13. *Marcas y composición de ciertos broncees*

Marcas de broncees	Contenido de los elementos de aleación, % en masa					
	estaño	fósforo	berilio	alumi- nio	níquel	cobre
Bronce 010	10	—	—	—	—	el resto
Bronce 0Φ6,5-0,15	6...7	0,15	—	—	—	»
Bronce A7	—	—	—	6...8	—	»
Bronce E2	—	—	2...2,2	—	0,2...0,5	»

Los broncees se trabajan fácilmente con corte, a presión y se sueldan bien. Con éstos se confeccionan bandas e hilos con los que se fabrican contactos de resorte, muelles conductores de corriente y otras piezas de corriente y constructoras.

Para el endurecimiento de las piezas de bronce se efectúa su tratamiento térmico: temple y, después revenido a temperaturas óptimas.

En lo referente a la conductibilidad eléctrica los bronce cedan al cobre, pero lo superan en cuanto a la resistencia mecánica, elasticidad, resistencias a la abrasión y a la corrosión.

En la tabla 14 se exponen las características fundamentales de los bronce en comparación con el cobre.

Tabla 14. Características fundamentales de los bronce y del cobre

Meterial	Carácter de su tratamiento	Conductibilidad, %	Esfuerzo de rotura durante la tracción, N/m ²	Alargamiento relativo durante la tracción, %
Cobre conductor (99,95% de cobre)	Blando	100	(20...27)·10 ⁷	35
	Duro	98	(36...44)·10 ⁷	2
Bronce de berilio (2% de berilio, 0,5% de níquel, lo restante es cobre)	Blando	36	(70...79)·10 ⁷	20
	Duro	26	(160...175)·10 ⁷	9
Bronce fosforoso (6—7% de estaño, 0,15% de fósforo, lo restante es cobre)	Blando	15	(40...45)·10 ⁷	60
	Duro	10	(95...105)·10 ⁷	3

Con los bronce conductores se fabrican hilos para las líneas del transporte eléctrico, láminas para los colectores de las máquinas eléctricas, muelles electroconductores y piezas elásticas de contacto para los aparatos eléctricos.

El aluminio es, después del cobre, el segundo material conductor debido a su conductibilidad relativamente grande y resistencia a la corrosión atmosférica. El aluminio pertenece al grupo de los metales ligeros, ya que su densidad es de 2700 kg/m³, es decir, es 3,3 veces más ligero que el cobre. El aluminio es un metal de color plateado blanco con temperatura de fusión de 658 °C. Se distingue por su poca dureza y su relativamente pequeña resistencia mecánica a la tracción (7,5...18)·10³ N/m², y además el aluminio tiene, en comparación con el cobre,

un coeficiente más grande de temperatura por dilatación lineal ($24 \cdot 10^{-6}$ $1/^{\circ}\text{C}$), lo que es un defecto del aluminio.

Al aire el aluminio se cubre rápidamente de una capa fina de óxido (Al_2O_3), que lo protege firmemente contra la penetración del oxígeno del aire. A su vez esta capa posee una considerable resistencia eléctrica. Por esto, en los lugares mal limpiados las conexiones de los conductores de aluminio pueden tener grandes resistencias de contacto.

Durante la humectación de los puntos de conexión de los conductores de aluminio con los conductores de otros metales se pueden originar pares galvánicos. En este caso el conductor de aluminio se destruirá por las corrientes galvánicas locales que surgen. Para evitar el surgimiento de los pares galvánicos los puntos de conexión se protegen minuciosamente contra la humedad (por ejemplo, con lacas). Cuanto mayor es la pureza química del aluminio tanto mejor resiste éste a la corrosión.

La industria nacional produce aluminio conductor de 13 marcas con distinto grado de pureza. En las marcas de aluminio de pureza especial el contenido de impurezas (hierro, silicio, zinc, titanio y cobre) no supera el 0,005 %. Con estas clases de aluminio se fabrican los electrodos de los condensadores electrolíticos, y también la hoja de aluminio. El alambre para los conductores se fabrica de aluminio que contiene no más de 0,3 y 0,5 % (marcas A7E y A5E). Se fabrica alambre de aluminio blando (AM), semiduro AHT y duro (AT) de 0,08 y 10 mm de diámetro, y barras de sección rectangular.

Los artículos de aluminio puro tienen las características siguientes: $\sigma_t = (8 \dots 10) \cdot 10^7$ N/m^2 ; $e_t = 10 \dots 25$ %; $\rho = 0,028 \mu\Omega \cdot \text{m}$; en los artículos de aluminio duro $\sigma_t = (10 \dots 18) \cdot 10^7$ N/m^2 ; $e_t = 0,5 \dots 2$ %; $\rho = 0,0283 \mu\Omega \cdot \text{m}$. El coeficiente de temperatura de la resistencia específica se toma igual a $0,00423$ $1/^{\circ}\text{C}$ para todas las marcas de aluminio.

Los conductores de aluminio y las piezas conductoras de corriente se pueden unir entre sí mediante la soldadura en frío o en caliente, asimismo como con soldadura, pero con el empleo de aleaciones para soldar y fundentes es-

peciales. La soldadura en frío se efectúa en dispositivos especiales, en los que las superficies limpias de las piezas de aluminio conectan entre sí a una presión de $10000 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$, aproximadamente. Con esto tiene lugar la difusión de los cristales de una de las piezas que se juntan a la otra, como resultado de lo cual las piezas se unen firmemente entre sí. El aluminio en hojas se utiliza ampliamente para las pantallas.

La plata pertenece al grupo de los metales nobles que no se oxidan en el aire a la temperatura ambiente. La oxidación intensa de la plata comienza desde la temperatura de 200°C y más. Igual que todos los metales nobles la plata se distingue por su elevada plasticidad, que permite obtener hojas y alambres de hasta $0,01 \text{ mm}$ de diámetro. Además, la plata se distingue por tener una conductibilidad máxima.

Las características fundamentales de la plata conductora son: densidad 10500 kg/m^3 ; el punto de fusión es de $960,5^\circ\text{C}$; el coeficiente de temperatura de dilatación lineal es $19,3 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, es decir, un poco mayor que el del cobre; en los artículos de plata blanda $\sigma_t = (15...18) \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$; $e_t = 45...50 \%$; $\rho = 0,015 \mu\Omega \cdot \text{m}$; para los artículos de plata dura $\sigma_t = (2030) \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$; $e_t = 46 \%$; $\rho = 0,0158 \mu\Omega \cdot \text{m}$; el coeficiente de temperatura $\rho = 0,00369 \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

En comparación con el cobre y el aluminio la plata encuentra un empleo limitado: en las aleaciones con el cobre, níquel o cadmio, para los contactos de los relé y de otros instrumentos de corrientes pequeñas, y asimismo en las soldaduras ПСр-10; ПСр-25 y otras.

El tungsteno pertenece al grupo de los metales de alta temperatura de fusión y se emplea ampliamente en la producción electrotécnica en calidad de material resistente al desgaste para los contactos eléctricos y para las piezas de los dispositivos eléctricos al vacío (filamentos de las lámparas de incandescencia, electrodos y otros).

El tungsteno es un metal de color gris con temperatura de fusión muy elevada y de gran dureza. Se obtiene con el método de la pulvimetalurgia, es decir, como resultado de la sinterización de las partículas prensadas de metal. Para ello con las partículas de tungsteno (polvo),

mediante el prensado en moldes de acero, se obtienen las piezas brutas: las varillas. Seguidamente éstas se someten a sinterización a una temperatura de 1300 °C. En las varillas sinterizadas de tungsteno todavía se observa una estructura granular, y éstas poseen fragilidad. Después las varillas de tungsteno se calientan hasta la temperatura de 3000 °C. Para obtener un metal mecánicamente resistente las varillas se someten a forja y estirado múltiples con períodos interminentes de recocido. Como resultado de semejante tratamiento el tungsteno adquiere una estructura fibrosa, que le asegura una elevada resistencia mecánica y ductilidad. Con el tungsteno se fabrica alambre de hasta 0,01 mm de diámetro. La oxidación del tungsteno en el aire comienza a la temperatura desde 400 °C y más. En el vacío las piezas de tungsteno pueden trabajar a temperaturas de hasta 2000 °C.

Las características fundamentales del tungsteno son las siguientes: densidad 19300 kg/m³; temperatura de fusión 3380 °C; en los artículos de tungsteno recocido $\sigma_t = (5...8) \cdot 10^8$ N/m² y $\rho = 0,0503 \mu\Omega \cdot m$; en los artículos de tungsteno duro $\sigma_t = 10^{18}$ N/m² y $\rho = 0,612 \mu\Omega \cdot m$. El coeficiente de temperatura de la resistencia $TK\rho = 0,0046$ 1/°C.

§ 31. Materiales conductores de resistividad grande *

Este grupo de materiales conductores son aleaciones de metales que poseen una resistividad grande y un valor pequeño del coeficiente de temperatura de la resistividad. Esto permite crear con estas aleaciones resistencias termoestables y otros artículos cuya resistencia eléctrica no depende prácticamente de la temperatura.

Son poseedores de las propiedades enumeradas las aleaciones que son disoluciones sólidas de metales, con estructura desordenada. Los representantes principales de este grupo de materiales conductores son las aleaciones del cobre con el níquel, conocidas bajo los nombres de manganina y constantán.

* Estos materiales también se denominan aleaciones de elevada resistencia eléctrica.

La manganina es una aleación de 84 a 86 % de cobre, de 2 a 3 % de níquel y de 12 a 13 % de manganeso*. El color de la manganina es anaranjado claro, su densidad es de 8400 kg/m^3 , su punto de fusión es de 960°C y el coeficiente de temperatura de dilatación lineal es igual a $18 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^\circ\text{C}$.

Las características fundamentales de los artículos de manganina son: $\sigma_t = (45 \dots 55) \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$; $e_t = 10 \dots 25 \%$; $\rho = 0,42 \dots 0,47 \mu\Omega \cdot \text{m}$; en los artículos duros $\sigma_t = (55 \dots 58) \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$; $e_t = 5 \dots 9 \%$; $\rho = 0,47 \dots 0,5 \mu\Omega \cdot \text{m}$; el coeficiente de temperatura $\rho = (2 \dots 6) \cdot 10^{-5} \text{ } 1/^\circ\text{C}$. Para elevar la resistencia específica eléctrica hasta $1,5 \dots 2 \mu\Omega \cdot \text{m}$ en la composición de la manganina se añaden cantidades elevadas de manganeso (60...67 %) y de níquel (16...30 %) a cuenta de la disminución del contenido de cobre.

Es una cualidad de los artículos de manganina el hecho de que su resistencia eléctrica depende muy poco de la temperatura. Otra de sus cualidades es su pequeñísima f.e.m. térmica de contacto con el cobre ($0,9 \dots 1 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$).

Para la estabilización de las características eléctricas de los artículos de manganina, éstos se someten a un tratamiento térmico en el vacío a 400°C y un largo mantenimiento a la temperatura ambiente. Como resultado de este tratamiento aumenta la homogeneidad de la aleación y se estabilizan sus propiedades. La temperatura máxima admisible para los artículos de las marcas estabilizadas de manganina es de 200°C , y de 60°C para las marcas no estabilizadas. Al exceder estas temperaturas en los artículos de manganina suceden alteraciones irreversibles de sus propiedades.

Con la manganina se fabrican alambres blandos y estirados en duro de 0,02 a 6 mm de diámetro y cintas de 0,08 mm de espesor y 270 mm de ancho. Además, se fabrican hilos de manganina para bobinado con aislamiento de esmalte, con aislamiento de seda natural, y asimismo aislados con esmalte y una capa de seda natural. Los artículos de manganina se emplean en la producción de resistencias y potenciómetros de alta clase.

* En ciertas clases de manganina se introduce también cobalto.

El constantán es una aleación de 58 a 60 % de cobre, de 32 a 40 % de níquel y de 1 a 2 % de manganeso. El color del constantán es amarillo argentado; su densidad, de 8900 kg/m³; su punto de fusión, 1260 °C y el coeficiente de temperatura de dilatación lineal es igual a $14 \cdot 10^{-6}$ 1/°C.

Las características fundamentales de los artículos de constantán (alambre) son: blando (reccido), $\sigma_t = (40 \dots 50) \cdot 10^7$ N/m², $e_p = 40 \dots 50$ %; $\rho = 0,45 \dots 0,48$ $\mu\Omega \cdot m$; duro estirado, $\sigma_t = (65 \dots 72) \cdot 10^7$ N/m², $e_p = 2 \dots 5$ %; $\rho = 0,46 \dots 0,52$ $\mu\Omega \cdot m$. El coeficiente de temperatura de la resistividad en los artículos de constantán es de $(0 \dots 6) \cdot 10^{-5}$ 1/°C, es decir, en muchas de las composiciones de constantán la resistencia eléctrica no varía con el cambio de su temperatura.

Con el constantán se fabrican artículos blandos y duros: alambre de 0,03 a 5 mm de diámetro y cinta de hasta 0,1 mm de espesor. El alambre de constantán aislado, en conjunto con el alambre de cobre, se emplean para la fabricación de termopares. Los artículos de constantán (alambre, cintas) se pueden utilizar a temperaturas no superiores a 500 °C.

§ 32. Materiales conductores resistentes a altas temperaturas (termorresistentes)

Los materiales conductores resistentes a altas temperaturas son aleaciones a base de níquel, cromo y ciertos otros componentes. La resistencia a altas temperaturas de estas aleaciones, es decir, su inoxidabilidad a altas temperaturas está determinada por la formación en su superficie de una película de óxido de densidad grande, que excluye el acceso del oxígeno a la aleación. La base de las películas de óxido resistente a altas temperaturas es el óxido de cromo Cr₂O₃ y el protóxido de níquel NiO, que no se evaporan de la superficie de la aleación a temperaturas elevadas. Los materiales conductores resistentes a altas temperaturas fabricados a base del níquel, cromo y aluminio se denominan, respectivamente, nicromos, hierrocrales y cromales. Todos ellos representan disoluciones sólidas de metales de estructura desordenada.

Tabla 15. Composición y características fundamentales de las aleaciones conductoras resistentes a altas temperaturas

Marca de la aleación	Tipo de la aleación	Composición, % de				Resistividad, $\mu\Omega \cdot m$	Coeficiente de temperatura de la resistencia, $1/^\circ C$	Temperatura admisible, $^\circ C$
		cromo	níquel	aluminio	titanio			
X15H6)	Nicromo	15...18	55...61	—	—	Lo restante	$12 \cdot 10^{-5}$	950...1000
X20H8)	»	20...23	77...80	—	—	»	$9 \cdot 10^{-5}$	1050...1100
X13IO4	Hierrocral	12...15	0,6	3,5...5,5	—	»	$15 \cdot 10^{-5}$	850...950
X23IO5T	Cromal	26...28	0,6	5,0...5,8	—	»	$5 \cdot 10^{-5}$	1000...1150

Observación. La densidad de las aleaciones enumeradas en la tabla es (7,2...8,4) 10^3 kg/m³; la tensión, de rotura de tracción, (65...80) $\cdot 10^7$ N/m².

da, por lo que estas aleaciones poseen una resistencia específica grande y valores pequeños del coeficiente de temperatura de la resistencia.

En las marcas de las aleaciones las letras indican las partes fundamentales de la aleación: (X), cromo (Cr); (H), níquel (Ni); (A), aluminio (Al) y (T), titanio (Ti). La cifra que sigue a la letra señala la cantidad media de este metal en la aleación. Por ejemplo, en el nicromo marca X20H80 hay un 20 % de cromo y un 80 % de níquel (en masa).

En la tabla 15 se expone la composición y las características fundamentales de algunas aleaciones resistentes a altas temperaturas, utilizadas ampliamente en la práctica.

Además de los componentes principales, enumerados en la tabla 15, en la composición de las aleaciones resistentes a altas temperaturas figuran impurezas (0,06...0,15 % de carbono, 0,5...0,35 % de fósforo y 0,03 % de azufre) que provocan cierta fragilidad del alambre y de las cintas fabricadas de estas aleaciones. En la producción de todas las aleaciones conductoras se procura alcanzar un mínimo de contenido de impurezas.

Las ramas principales de aplicación de los artículos de aleaciones resistentes a altas temperaturas (alambres y cintas) son los aparatos de calentamiento eléctrico, los reóstatos y las resistencias.

§ 33. Materiales y artículos metalocerámicos

Se denominan *metalocerámicos* los materiales que se obtienen de polvos metálicos mediante el prensado, sinterizándolos ulteriormente a altas temperaturas (1000...1400 °C). Las masas iniciales pulverulentas se componen de dos o más polvos de distintos metales, uno de los cuales debe poseer una mayor temperatura de fusión en comparación con los polvos de los otros metales. Durante el tratamiento a altas temperaturas (sinterización de los artículos de masa pulverulenta) los polvos más fusibles se funden y rellenan los poros entre las partículas del metal refractario. Como resultado se obtienen los artículos monolíticos metalocerámicos. En otros

casos, por el contrario, se requiere obtener artículos metalocerámicos porosos, por ejemplo, cojinetes, filtros y otros. Para ello se utiliza la sinterización de fase sólida de las partículas de los polvos de metal, que poseen aproximadamente una misma temperatura de fusión. A veces en la masa inicial, compuesta de polvos metálicos, se introduce un polvo de metaloide, por ejemplo, de grafito. Semejantes masas se emplean para la fabricación de escobillas metalográficas para las máquinas eléctricas*, contactos eléctricos y otras piezas. Los procedimientos descritos de obtención de artículos de masas pulverulentas prensadas con sinterización ulterior de sus partículas pertenecen a la pulvimetalurgia.

Los métodos de la pulvimetalurgia se emplean en aquellos casos de que no se pueden obtener artículos de aleaciones de metales particularmente de alta temperatura de fusión o de aleaciones de metales particularmente puros, o cuando se requiere obtener artículos de una aleación de metales y metaloides. Además, los métodos de la pulvimetalurgia permiten obtener artículos de dimensiones prefijadas, sin maquinado ulterior. Como resultado de ello disminuyen bruscamente las pérdidas en forma de desechos de metal. En la producción electrotécnica los métodos de la pulvimetalurgia se emplean ampliamente para la fabricación de artículos electrocarbónicos, ciertas clases de materiales magnéticos** y electrocontactos de fuerte intensidad de corriente.

En comparación con los contactos de plata, cobre, tungsteno y de aleaciones de metales los contactos metalocerámicos se distinguen por su elevada resistencia al desgaste, permiten grandes fuerzas de compresión y poseen resistencia a la erosión***. En los aparatos eléctricos de baja tensión encuentran amplio empleo los contactos de material metalocerámico a base de polvos de plata y de óxido de cadmio ($\text{CdO} \approx 15\%$). Estos poseen todas las características típicas de los artículos

* Véase § 33.

** Véase § 40.

*** La erosión es la destrucción de la superficie de los contactos bajo la acción de las chispas y arcos eléctricos.

metalocerámicos. Además, pueden trabajar con seguridad en las condiciones del clima tropical.

En calidad de contactos extintores de arco de corriente fuerte se emplean piezas de metalocerámica fabricadas de polvos de plata, tungsteno (40...50 %) y níquel (2...3 %). Las piezas metalocerámicas de esta composición poseen plasticidad y admiten toda clase de maquinado.

Los contactos metalocerámicos fabricados de polvos de cobre y grafito se distinguen por su grande resistencia a la fusión al extinguir corrientes grandes (30 000...100 000 A). Esto se alcanza no sólo con la composición y estructura del material electrocerámico a base de polvos de cobre y grafito (3...5 %), sino también por la existencia en el material de un 10...15 % de poros. En la producción de artículos metalocerámicos se puede cambiar la cantidad de poros en ellos en amplios límites. En los contactos metalocerámicos para corrientes no grandes la porosidad no debe superar un 2...5 %. Esto se logra mediante el prensado reiterado de los artículos metalocerámicos con tratamiento térmico ulterior: el recocido.

§ 34. Artículos eléctricos de carbón

A los artículos eléctricos de carbón pertenecen las escobillas para las máquinas eléctricas, las piezas de contacto, los carbones para iluminación eléctrica y otros.

Los artículos eléctricos de carbón se fabrican con los métodos de la tecnología de polvos con mezclas de materiales carbonosos: grafito, coque, negro, antracita. En la composición inicial de ciertos artículos eléctricos de carbón se introducen también polvos metálicos (de cobre, plomo, estaño y otros). Además, en la producción de los artículos eléctricos de carbón se emplean sustancias aglutinantes: resinas de carbón mineral y sintéticas, de baquelita, silicónicas y otras.

Todos los materiales eléctricos de carbón, excepto el grafito y el negro, se calcinan previamente a temperaturas de 1200 a 1300 °C con el fin de eliminar las sustancias volátiles y disminuir la contracción volumétrica de los artículos eléctricos de carbón. Los materiales carbonosos calcinados se trituran en las quebradoras hasta

el estado pulverulento. Los materiales iniciales en polvo (carbonosos y metálicos) tomados en determinada correlación se mezclan minuciosamente entre sí. Después en la mezcla se introducen sustancias aglutinantes (resinas, breas) que se amalgaman con los materiales pulverulentos a la temperatura de 110 a 230 °C, haciéndolos pasar a través de mezcladoras especiales.

La masa inicial eléctrica de carbón, obtenida después del mezclado, se seca y después se muele y se tamiza a través de una criba. Como resultado se obtiene el polvo para prensar (polvo de moldear). Con éste se fabrican, mediante el prensado en moldes de acero, diferentes artículos eléctricos de carbón o piezas brutas (bloques) de los que, por medio de la aserradura y el rectificado, se obtienen las escobillas eléctricas y otros artículos. Las piezas eléctricas de carbón se prensan a la temperatura ambiente o a 180...210 °C (en dependencia del aglutinante elegido). En caso de que se aplique un aglutinante que se ablande o polimerice a temperaturas elevadas el prensado de los artículos eléctricos de carbón se realiza a temperaturas grandes. Los artículos eléctricos de carbón se prensan a presiones desde 100 hasta 300 MPa.

Los artículos de extensión lineal grande (carbones de iluminación eléctrica y otros) se fabrican con el método de extrusión de la masa inicial plástica caliente a través de la boquilla de acero de la prensa de tornillo. Después, los artículos eléctricos de carbón obtenidos o sus piezas brutas (bloques) se someten a un tratamiento a alta temperatura: calcinación en hornos especiales en el intervalo de temperaturas de 1200 a 1300 °C. Durante el proceso de la calcinación tiene lugar la sinterización, es decir, la combinación de las partículas de los materiales iniciales y su cementación con coque, que se origina de las sustancias orgánicas aglutinantes.

Como resultado de la calcinación los artículos eléctricos de carbón obtienen resistencia mecánica y la posibilidad de ser trabajados con maquinado. Con esto disminuye la magnitud de su resistencia específica eléctrica. Los artículos eléctricos de carbón que contienen negro, coque y otros componentes no de grafito, después de la calcinación, se someten a un tratamiento térmico comple-

mentario (a 2400...2800 °C) denominado *grafitización*. En este caso los componentes que no son de grafito se convierten en éste, mientras que la mayoría de las impurezas de los artículos se volatiliza. Como resultado de la grafitización las escobillas eléctricas (grupo ЭГ (EG)) y otros artículos adquieren cierta blandura, disminuye el coeficiente de rozamiento y disminuye bruscamente su resistencia eléctrica específica.

Los artículos eléctricos de carbón, obtenidos después de la grafitización y de la elaboración mecánica (aserradura, rectificado), poseen una porosidad grande (hasta 30 %). Por esto se someten a impregnación con barnices o con sustancias ceráceas, y en algunos casos también con metales fundidos (estaño, plomo y otros). La impregnación de los artículos eléctricos de carbón se efectúa a temperaturas de 80 a 200 °C y más, cuando la sustancia impregnante se encuentra en estado líquido. La impregnación tiene el fin de eliminar la porosidad y disminuir la higroscopicidad de los artículos eléctricos de carbón y, a veces, introducir en ellos sustancias lubricantes (ceráceas). La impregnación de los artículos eléctricos de carbón con metales aumenta bruscamente su resistencia mecánica y eleva su conductibilidad.

Los artículos eléctricos de carbón (escobillas eléctricas y otros) se someten a un tratamiento mecánico para darles una forma acabada y finura de la superficie. Las piezas brutas (bloques) de las escobillas eléctricas de carbón se cortan en pedazos pequeños con ayuda de fresas o de muelas finas de carborundo en tornos especiales. Después en los artículos se taladran agujeros para los conductores flexibles de conexión.

Ciertos tipos de escobillas eléctricas y de carbones para la iluminación, después del maquinado, se someten al cobreado. Para ello una parte de su superficie se cubre con una capa fina de cobre, que crea un contacto eléctrico seguro entre el cuerpo de la escobilla eléctrica y el portaescobillas en la máquina eléctrica. El cobreado de los artículos se realiza con el método galvánico. La capa de cobre que se origina en los artículos tiene un espesor de 10 a 15 μm . Los conductores flexibles (multiconductores) se fijan en el cuerpo de la escobilla eléctrica me-

diente el abocardado, soldadura o prensado. En las escobillas eléctricas acabadas se controlan las dimensiones, la dureza, la resistencia mecánica, la resistencia eléctrica específica, la caída de tensión entre la escobilla y el colector, el coeficiente de rozamiento, la resistencia transitoria entre el hilo conductor de corriente y la escobilla eléctrica, y otras características.

Entre los artículos eléctricos de carbón han obtenido un mayor empleo las escobillas para las máquinas eléctricas y las piezas de contacto. Se distinguen los siguientes tipos de escobillas: de grafito, de carbón-grafito, metalografíticas y electrografitadas*.

Las *escobillas de grafito* se fabrican de grafito natural. Estas se caracterizan por su suavidad, no provocan ruido durante el trabajo y se emplean para velocidades periféricas desde 20 hasta 40 m/s. Su resistencia eléctrica específica es de 8 a 30 $\mu\Omega \cdot m$.

Las *escobillas de carbón-grafito* se fabrican de grafito, negro, coque y resinas aglutinantes. Estas escobillas poseen una dureza elevada, resistencia mecánica y abrasividad. Estas escobillas pueden limpiar las películas de óxido en los colectores y en los anillos de las máquinas eléctricas. Las escobillas se emplean para velocidades periféricas desde 10 hasta 40 m/s. Su resistencia específica es de 100 a 400 $\mu\Omega \cdot m$.

Las *escobillas metalografíticas* se fabrican de polvos de grafito y de cobre, y en algunas de ellas se introducen también polvos de estaño y de plata. Estas escobillas poseen una resistencia eléctrica específica de pequeña magnitud: de 0,3 a 0,8 $\mu\Omega \cdot m$, y en las escobillas con contenido reducido de cobre la resistencia específica es de 5 a 22 $\mu\Omega \cdot m$. Estas escobillas se emplean para velocidades periféricas de 20 a 25 m/s.

Las *escobillas electrografitadas* se fabrican de grafito, coque, negro y resinas aglutinantes. Después del prensado y calcinado en los hornos las escobillas ingresan en hornos eléctricos para su grafitización a 2500 °C. Con esto la composición de las escobillas se enriquece con

* Más detalladamente respecto a las escobillas véase *Nikulin N. V.* «Prontuario del joven eléctrico respecto a materiales y artículos electrotécnicos» (en ruso).

grafito, lo que garantiza a las escobillas una resistencia mecánica elevada y la posibilidad de su empleo a velocidades periféricas elevadas de 40 a 90 m/s. La resistencia eléctrica específica de las escobillas es de 12 a 75 $\mu\Omega \cdot m$. Este grupo de escobillas se emplea en las máquinas eléctricas con condiciones difíciles de conmutación.

Los electrodos de carbón se caracterizan por su resistencia al arco eléctrico, se oxidan muy lentamente, no arden y no se funden hasta la temperatura de 3800 °C. Estos electrodos encuentran una amplia utilización en los aparatos eléctricos de potencia grande.

Las piezas de contacto para las locomotoras eléctricas, trolebuses y otros dispositivos tomacorrientes se fabrican de masas eléctricas de carbón y de cobre-grafito. Estos artículos, en estado terminado, se caracterizan por tener una resistividad muy pequeña: 0,02...0,05 $\mu\Omega \cdot m$.

Preguntas de control

1. ¿En qué grupos se clasifican los materiales conductores?
2. Enumere las características fundamentales del cobre conductor.
3. Enumere las propiedades fundamentales de los bronce.
4. Enumere las características fundamentales del aluminio conductor.
5. ¿Qué son los materiales conductores de resistividad grande?
6. Enumere las propiedades fundamentales de la manganina y del constantán.
7. ¿Qué representan los materiales conductores resistentes a altas temperaturas y dónde se emplean?
8. ¿Qué son los materiales eléctricos de carbón y en qué grupos se dividen?
9. ¿Qué representan los materiales metalocerámicos y dónde se emplean?

Capítulo IV

Artículos conductores (de cables)

§ 35. Hilos de bobinado

Los hilos de bobinado se emplean para la fabricación de los devanados de las máquinas eléctricas, aparatos e instrumentos eléctricos. Se confeccionan con almas de cobre conductor, aluminio conductor y de aleaciones de gran resistividad (manganina, constantán, nicromio y otras). Las almas de los hilos de bobinado pueden tener aislamiento de esmalte, de película, fibroso y de esmalte-fibra.

Hilos con aislamiento de esmalte. El aislamiento de esmalte tiene un grosor mínimo (0,003...0,060 mm) en comparación con el de película o de fibra. Esto permite colocar en un mismo espacio del devanado un mayor número de conductores y, por ello mismo, aumentar la potencia de la máquina eléctrica o del aparato. El aislamiento de esmalte representa un recubrimiento flexible de barniz, obtenido como resultado de la solidificación de una capa densa de esmalte-barniz aplicada al conductor en máquinas especiales para barnizar.

En la tabla 16 se expone el surtido principal de hilos de cobre para devanado con aislamiento de esmalte.

Al tipo principal de hilos de bobinado con resistencia al calor clase A (105 °C) pertenecen los hilos ПЭВ-1 (PEV), ПЭВ-2 y ПЭМ-1 (PEM), ПЭМ-2 con aislamiento mecánicamente rígido a base de resinas polivinilacetálicas. Estos hilos se utilizan ampliamente para la fabricación de devanados de las máquinas eléctricas de uso industrial general. El aislamiento de los hilos ПЭМ-1 y ПЭМ-2 es resistente al aceite de petróleo, y por esto los hilos encuentran también empleo para la fabricación de los devanados de los aparatos rellenos de aceite.

Para el aislamiento de resistencia al calor clase E (120 °C) se destinan los hilos de bobinado ПЭБТЛ

Tabla 16. *Surtido principal de los hilos de bobinado con aislamiento de esmalte*

Marca del hilo	Diámetro del alma sin aislamiento, mm	Diámetro exterior del hilo, mm	Característica general
ПЭВ-1	0,02...2,5	0,035...2,6	El hilo es de cobre, aislado con barniz БЖ-931
ПЭВ-2	0,05...2,5	0,08...2,63	Ídem, pero la capa de esmalte-barniz del aislamiento es de mayor espesor
ПЭВА	0,08...2,44	0,105...2,55	Ídem, pero con alma de aluminio
ПЭМ-1	0,05...2,12	0,07...2,22	El hilo es de cobre, aislado con barniz БЖ-941
ПЭМ-2	0,05...2,12	0,08...2,25	Ídem, pero la capa de aislamiento de esmalte-barniz es de mayor espesor
ПЭВТЛ-1	0,02...1,6	0,027...1,64	El hilo es de cobre, aislado con barniz de poliuretano, se estaña
ПЭВТЛ-2	0,02...1,6	0,03...1,67	Ídem, pero la capa de aislamiento de esmalte-barniz es de mayor espesor
ПЭТВ	0,06...2,5	0,07...2,57	El hilo es de cobre, aislado con barniz de poliéster ПЭ-943
ПЭТВА	0,08...2,4	0,08...2,55	Ídem, pero con alma de aluminio
ПЭТ-155	0,06...2,5	0,08...2,63	El hilo es de cobre, aislado con barniz resistente al calor a base de poliimidoéteres
ПЭТ-200	0,05...2,5	0,057...2,63	El hilo es de cobre, aislado con barniz poliamídico resistente al calor
ПНЭТ-imida	0,02...2,5	0,035...2,6	El hilo es de cobre, níquelado, aislado con barniz polimídico resistente al calor

(PEVTL)-1 y ПЭБТЛ-2, esmaltados con esmaltes-barnices de poliuretano. Los esmaltes-barnices originan un recubrimiento aislante de los hilos mecánicamente rígido, que además posee termoplasticidad, es decir, se ablanda a la temperatura de 160 °C. Ello limita la esfera de aplicación de los hilos (devanados de las máquinas eléctricas y aparatos de poca potencia).

Una particularidad de estos hilos es el hecho de que se pueden estañar y soldar sin limpiar previamente el aislamiento. Este último, durante la soldadura, se ablanda y, en estado derretido es la sustancia fundente que garantiza la soldadura de los hilos con aleaciones para soldar de estaño-plomo.

Los hilos ПЭТБ (PETV), esmaltados con barniz de poliéster base del lavsán, son de mayor resistencia al calor (130 °C).

Con el fin de elevar la resistencia mecánica del aislamiento de esmalte-barniz se confeccionan los hilos ПЭТБМ (PETVM) con aislamiento de este mismo tipo de espesor agrandado. Este aislamiento permite realizar el devanado mecanizado de los arrollamientos de las máquinas y aparatos eléctricos, es decir, resiste bien las dobladuras y las distensiones.

Para los aislamientos de la clase de resistencia al calor F (155 °C) se fabrican los hilos ПЭТ (PET)-155 con aislamiento de esmalte-barniz a base de poliimidas, que posee buenas propiedades aislantes.

Para el devanado mecanizado de las bobinas con aislamiento de esta misma clase de resistencia al calor se confeccionan hilos de la marca ПЭТМ (PETM), cuyo aislamiento de esmalte-barniz, teniendo una misma resistencia al calor, posee una elevada rigidez mecánica.

El aislamiento de esmalte-barniz, para el funcionamiento a una temperatura de 180 a 200 °C, es propio de los hilos marca ПЭТ (PET)-200. Este aislamiento se confecciona a base de las poliimidas, que poseen un nivel elevado de propiedades eléctricas y mecánicas.

Los hilos ПНЭТ (PNET)-imidas se destinan para el funcionamiento a una temperatura de 220 °C, y se componen de una alma de cobre niquelado, cubierta por un

aislamiento de esmalte-barniz sobre una base poliimida resistente al calentamiento, que posee un nivel elevado de propiedades eléctricas.

Se han elaborado y se emplean los hilos de bobinado ПЭЖБ (PEZhB) de aislamiento inorgánico (esmalte fundido), que pueden trabajar a una temperatura de 300 °C, y con corta duración a una temperatura de hasta 600 °C.

Los hilos con aislamiento de papel se fabrican con almas de cobre y aluminio, que tienen el aislamiento en forma de un envolvimiento de papel para revestir cables con espesor de 0,10 a 0,12 mm. La esfera principal de aplicación de los hilos con aislamiento de papel son los devanados de los transformadores con aislamiento interno de aceite. El aislamiento de papel, impregnado de aceite, posee una rigidez eléctrica grande, de un orden de 80 MV/m. El espesor del aislamiento de papel supera muchas veces el espesor del aislamiento de esmalte-barniz, pero se distingue por tener una rigidez eléctrica mayor.

Los hilos con aislamiento fibroso se confeccionan de almas de cobre y aluminio de sección redonda y rectangular. El aislamiento de las almas representa un envolvimiento ordinario o doble de hilado de algodón, seda o hilado de fibras sintéticas (lavsán, caprón) o de vidrio. Los hilos con aislamiento de fibra de vidrio poseen una máxima resistencia al calor.

El surtido principal de estos hilos se expone en la tabla 17. El espesor del aislamiento fibroso supera en mucho el espesor del aislamiento de esmalte-barniz, pero la rigidez eléctrica del aislamiento de fibra, impregnado con barnices o compuestos supera en mucho la rigidez eléctrica del aislamiento de esmalte. Los devanados fabricados con hilos de aislamiento de fibra requieren un secado minucioso y un impregnado con barnices o compuestos aisladores.

Los hilos con aislamiento de esmalte-fibra se componen de un alma de cobre esmaltado de sección redonda, en los que por encima de la capa de esmalte se aplica una capa de aislamiento, compuesta de hilos de algodón, seda, lavsán o vidrio. Semejante capa doble de los hilos les garantiza unas resistencias mecánica y eléctrica elevadas.

Tabla 17. *Surtido principal de los hilos de bobinado con aislamiento fibroso**

Marca del hilo	Diámetro del alma sin aislamiento, mm	Diámetro exterior del hilo, mm	Característica general
ПБД	0,38...5,2	0,6...5,35	El hilo es de cobre, aislado con dos capas de devanado de hilado de algodón
АПБД	1,35...8,0	1,62...8,35	Idem, pero con alma de aluminio
ПЛБД	0,38...5,2	0,59...5,53	El hilo es de cobre, aislado con una capa de devanado de fibra de lavsán y con una capa de devanado de hilado de algodón
АПЛБД	1,35...8,0	1,62...8,35	Idem, pero con alma de aluminio
ПЛД	0,38...1,3	0,57...1,52	El hilo es de cobre, aislado con dos capas de devanado de fibra de lavsán
ПСД	0,31...5,2	0,55...5,58	El hilo es de cobre, aislado con dos capas de devanado de fibra de vidrio, impregnada con barniz resistente al calor
АПСД	1,65...5,2	1,90...5,52	Idem, pero con alma de aluminio
ПСДК	0,31...5,52	0,55...5,58	El hilo es de cobre, aislado con dos capas de devanado de fibra de vidrio, impregnado con barniz silicónico resistente al calor

*) Aquí se exponen los hilos con almas de sección redonda, conjuntamente con los cuales se confeccionan hilos de sección rectangular.

Los conductores con aislamiento de esmalte-fibra se utilizan ampliamente para la fabricación de los devanados de las máquinas y aparatos eléctricos en los que pueden haber cargas mecánicas elevadas sobre los hilos tanto en el proceso de fabricación de los devanados como en el

Tabla 18. *Surtido principal de los hilos de bobinado con aislamiento de esmalte-fibra*

Marca del hilo	Diámetro del alma sin aislamiento, mm	Diámetro exterior del hilo, mm	Característica general
ПЭВБД	0,69...2,1	0,90...2,4	El conductor es de cobre, aislado con esmalte de elevada resistencia y con dos capas de hilo de algodón
ПЭВШО	0,2...1,5	0,29...1,65	El hilo es de cobre, aislado con esmalte de elevada resistencia y con una capa de devanado de seda natural
ПЭТЛО	0,2...1,3	0,33...1,5	El hilo está aislado con barniz de resistencia elevada al calor y con una capa de devanado de fibra de lavsán
ПЭТКСОТ	0,33...1,56	0,48...1,74	El hilo está aislado con barniz silicónico y con una capa de devanado de fibra adelgazada de vidrio, impregnada con barniz silicónico resistente al calor

proceso de su explotación. El surtido principal de los hilos se expone en la tabla 18.

El aislamiento de fibras de lavsán y de caprón posee una máxima rigidez mecánica y resistencia a la abrasión. El aislamiento de hilo de vidrio posee una máxima resistencia al calor.

§ 36. Hilos y cables de montaje

Estos hilos se destinan para distintos géneros de conexiones en los instrumentos, aparatos eléctricos y otros dispositivos electrotécnicos. Las almas conductoras de corriente de los hilos y de los cables de montaje se fabrican de cobre conductor estañado. Las almas pueden ser

monofilares, para el montaje fijado, y multifilares, en los hilos y cables para el montaje no fijado. La sección de las almas en los hilos es desde 0,05 hasta 2,5 mm², y en los cables de montaje es desde 0,35 hasta 1,5 mm². La cantidad de almas en el cable es desde 1 hasta 52.

En los hilos de montaje de elevada resistencia al calor (200...250 °C) se emplean almas niqueladas de cobre. El aislamiento de estos conductores se compone de plástico fluorocarbúrico o de cintas de plástico fluorocarbúrico en combinación con un revestimiento de fibra de vidrio. La inmensa mayoría de las marcas de los hilos y cables de montaje se destinan para el trabajo en un intervalo de temperaturas desde -50 hasta +70 °C. Las almas de estos conductores tienen un aislamiento plástico flexible resistente a la humedad, de polietileno o de caucho plastificado de policloruro de vinilo.

En algunas estructuras de hilos y cables de montaje, por encima del aislamiento principal, se emplea también un revestimiento protector de caprón. Estos hilos y cables se emplean para tensiones de hasta 1000 V de corriente alterna o de 1400 V de corriente continua.

Se confeccionan también hilos de montaje con aislamiento de hilos de caprón o de vidrio. Estos hilos pueden trabajar a una temperatura desde -80 hasta +105 °C, pero en una atmósfera de humedad normal. Las tensiones de trabajo de estos conductores son: desde 24 V (MIII) (MGSh)* hasta 220 V (MIIIJL (MShDL)**.

Se confeccionan también hilos de montaje con aislamiento doble de fibra y de plástico (polietileno o de plástico de policloruro de vinilo). Estos conductores pueden trabajar a temperaturas desde -50 °C (aislamiento de plástico) y -60 °C (aislamiento de polietileno) hasta +70 °C y humedad de hasta 98 % (no más de 40 °C). Las tensiones de trabajo de los conductores, en dependencia de la marca de los hilos, es desde 380 hasta 1000 V de corriente alterna o, respectivamente, desde 500 hasta 1500 V de corriente continua.

* MIII es multifilar con revestimiento de hilo de caprón.

** MIIIJL es unifilar con un envolvimiento doble de hilos de caprón, barnizado.

§ 37. Conductores de instalación

Los conductores de instalación se emplean para la distribución de la energía eléctrica en las redes de fuerza y de alumbrado durante el tendido fijo dentro y fuera de los locales. Los conductores de instalación se fabrican con almas conductoras de cobre y aluminio, que pueden ser monofilares y multifilares (flexibles).

Los conductores de instalación pueden tener aislamiento de goma o de plásticos flexibles (polietileno, plástico de policloruro de vinilo). En algunos tipos de conductores de instalación el aislamiento básico de goma está metido en un revestimiento de hilo de algodón impregnado con una composición antipútrida.

Según sea el tipo y grosor del aislamiento los conductores de instalación se fabrican para tensiones de 380 y 660 V de corriente alterna.

El intervalo de temperaturas de trabajo para los conductores con aislamiento de goma es desde -40 hasta $+65$ °C y desde -40 hasta $+85$ °C (gomas a base del caucho butílico), en los conductores con aislamiento de plástico es desde -50 hasta $+70$ °C y en los conductores con aislamiento de goma silicónica es desde -60 hasta $+180$ °C (conductor PKFM y otros). Los representantes principales de este grupo de conductores se exponen en la tabla 19*.

El espesor del aislamiento de goma en los conductores de instalación para la tensión de 380 V es de 0,6 a 0,8 mm, y para la tensión de 660 V es de 1,2 a 1,8 mm, en dependencia de la sección del alma del conductor. El espesor del aislamiento de plástico de policloruro de vinilo y de polietileno en los conductores para tensión de 380 V es de 0,6 a 1,6 mm, y para la tensión de 660 V es de 0,8 a 1,8 mm, en dependencia de la sección del alma conductora de corriente.

* Más detalladamente respecto a los conductores de instalación véase: *Nikulín N. V.* «Prontuario del joven eléctrico respecto a materiales y artículos electrotécnicos» (en ruso).

Tabla 19. Conductores de instalación

Marca del conductor	Sección del alma, mm ²	Característica fundamental	Esfera de aplicación
ПП	0,75...120	Conductor con alma unifilar de cobre con aislamiento de goma y envolvimiento de hilo de algodón impregnado	Para tendido fijo dentro del local (sobre rodillos) y fuera del local (sobre aisladores) en las redes con tensión de hasta 660 V de corriente alterna
АПР	2,5...120	Idem, pero con alma unifilar de aluminio	Idem
ПРГ	0,75...120	Conductor flexible con alma multifilar de cobre, aislamiento de goma en un envolvimiento de hilo de algodón impregnado	Idem
ПРВ	1...10	Idem, pero en envolvimientos de plástico de policloruro de vinilo	Idem, y en los locales de humedad elevada
АПРВ	2,5...16	Idem, pero con alma de aluminio	Idem
ПВ	0,5...95	Conductor con alma unifilar de cobre, aislamiento de plástico de policloruro de vinilo	Para el tendido fijo en el interior y fuera de los locales en las redes con tensión de desde 380 hasta 660 V (en dependencia del grosor del aislamiento)
АПВ	2,5...120	Idem, pero con alma de aluminio	Idem
ПГВ	0,5...95	Conductor flexible con alma multifilar de cobre y aislamiento de plástico de policloruro de vinilo	Idem
ПП	0,5...95	Conductor con alma unifilar de cobre y aislamiento de polietileno	Idem
АПП	2,5...120	Idem, pero con alma de aluminio	Idem

Tabla 19. (continuación)

Marca del conductor	Sección del alma, mm ²	Característica fundamental	Esfera de aplicación
PKTM	0,75...120	Conductor flexible con alma multifilar de cobre, aislamiento de goma silicónica resistente al calor en un envolvimiento de hilo de vidrio impregnado con barniz	Para los terminales en las máquinas y aparatos eléctricos de resistencia al calor (180 °C) para tensiones de hasta 660 V

Preguntas de control

1. ¿Qué representan los hilos de bobinado y en qué grupos se dividen según su tipo de aislamiento?
2. ¿Cuál tipo de aislamiento de los hilos de bobinado les garantiza una máxima resistencia al calor?
3. ¿Qué representan los hilos de montaje y dónde se emplean?
4. ¿Qué representan los conductores de instalación y dónde se emplean?
5. ¿Qué tipo de aislamiento de los conductores de instalación les asegura una resistencia máxima al frío?

Capítulo V

Materiales semiconductores

§ 38. Propiedades fundamentales

De acuerdo con su conductibilidad eléctrica los semiconductores ocupan un lugar intermedio entre los conductores metálicos y los dieléctricos. Así, la resistencia específica eléctrica de los conductores es de $10^{-8} \dots 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$, en los semiconductores es de $10^{-6} \dots 10^{+7} \Omega \cdot \text{m}$, y en los dieléctricos es de $10^{+8} \dots 10^{+18} \Omega \cdot \text{m}$. En todos los conductores eléctricos, al elevar la temperatura, aumenta la resistencia eléctrica, mientras que en los semiconductores y dieléctricos disminuye.

En los conductores existe una cantidad enorme de electrones libres cuyo desplazamiento dirigido compone la corriente de conducción, mientras que en los semiconductores hay pocos electrones libres. Esto se explica por el hecho de que los electrones de valencia en los semiconductores están ligados con sus átomos, es decir, no son libres. Otra particularidad de los semiconductores es que en ellos la corriente puede surgir y variar en amplios límites solamente bajo el influjo de acciones externas: calentamiento, irradiación o durante la introducción de ciertas impurezas. Todo esto aumenta la energía de los electrones de valencia, lo que les permite arrancarse de sus átomos y, bajo la acción de la tensión aplicada, comenzar un desplazamiento dirigido, es decir, convertirse en portadores de corriente.

Cuanto mayor sea la temperatura del semiconductor o cuanto más intensa sea su irradiación tanto mayor será la cantidad de electrones libres y tanto mayor será la intensidad de la corriente en el semiconductor. Así pues, en todos los semiconductores la conductibilidad eléctrica es *por electrones* o de *tipo n^** , siendo así los electro-

* n -primera letra de la palabra latina «negativo», ya que el electrón es una partícula cargada negativamente.

nes que se liberan pertenecen a los átomos del propio semiconductor, por lo que a semejante conductibilidad eléctrica se la denomina propia.

Los átomos del semiconductor, habiendo perdido los electrones, se convierten en iones cargados positivamente, que están fijados a sus sitios y no pueden desplazarse. El lugar abandonado por el electrón en el orbital exterior del átomo se denomina *hueco*. Este hueco (vacancia) puede quedar ocupado por otro electrón, que ha abandonado

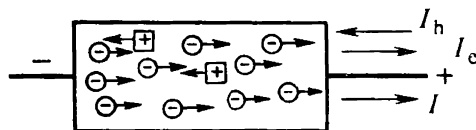


Fig. 24.

Esquema del movimiento de los electrones y de los huecos en el caso de conductibilidad eléctrica intrínseca del semiconductor

su puesto en el átomo vecino. Como resultado de semejante salto del electrón en el átomo vecino se originará también un hueco, es decir, el átomo se convertirá en un ion cargado positivamente.

Si se aplica al semiconductor una tensión eléctrica, los electrones saltarán de unos átomos a otros. Con esto los electrones se desplazan en una dirección, mientras que los huecos surgen en la dirección contraria. Se ha adoptado considerar que el hueco es una partícula cargada positivamente cuya carga es igual a la del electrón. El desplazamiento aparente de los huecos en la dirección opuesta al desplazamiento de los electrones se denomina *corriente por huecos*. La conductibilidad eléctrica del semiconductor, provocada por la corriente por huecos, se denomina *electroconductibilidad por huecos* o *electroconductibilidad de tipo p**.

Así pues, el desplazamiento de los electrones en una dirección y de los huecos en la dirección opuesta (fig. 24) determina la *conductibilidad intrínseca eléctrica* del semi-

* *p* es la primera letra de la palabra latina «positivo», ya que el hueco determina la aparición del ion cargado positivamente.

conductor, ya que los portadores de la corriente (electrones y huecos) pertenecen a los átomos propios del semiconductor. En este caso la corriente total I se compone de la corriente electrónica I_e y de la corriente por huecos I_h , es decir,

$$I = I_e + I_h. \quad (13)$$

En el caso de la conductibilidad eléctrica intrínseca del semiconductor el número de electrones N_e y de huecos N_h es igual. Pero $I_e > I_h$, pues la movilidad del electrón es mayor que la del hueco. La movilidad del portador de corriente es la relación existente entre la velocidad de desplazamiento del electrón v_e , o la velocidad de desplazamiento del hueco v_h , y la intensidad del campo eléctrico E en el semiconductor. Entonces la movilidad del electrón $\mu_e = v_e/E$, y la del hueco $\mu_h = v_h/E$. De este modo, la movilidad indica el trayecto que recorre en un segundo el electrón o el hueco si la intensidad $E = 1$ V/cm. Teniendo en cuenta lo dicho se pueden escribir las expresiones para las corrientes electrónica y por huecos:

$$I_e = N_e e v_e = N_e e \mu_e E, \quad (14)$$

$$I_h = N_h e v_h = N_h e \mu_h E, \quad (15)$$

donde e es la carga del electrón o del hueco y E es la intensidad del campo eléctrico.

Entonces la corriente total en el semiconductor

$$\begin{aligned} I &= I_e + I_h \text{ o } I = N_e e v_e + N_h e v_h = \\ &= N_e e \mu_e E + N_h e \mu_h E. \end{aligned} \quad (16)$$

En el caso de conductibilidad eléctrica intrínseca del semiconductor el número de electrones es igual al número de huecos, es decir,

$$N_e = N_h = N, \quad (17)$$

entonces la expresión (16) toma el aspecto

$$I = N e (\mu_e + \mu_h) E. \quad (18)$$

Pero muy frecuentemente se requieren materiales semiconductores exclusivamente con conductibilidad

eléctrica tipo *n* o *p*. Semejantes semiconductores se necesitan, por ejemplo, para crear rectificadores secos (de semiconductor). Esto se logra introduciendo en el semiconductor minuciosamente limpiado* la correspondiente sustancia de aleación.

Las sustancias de aleación, cuyos átomos abastecen de átomos libres al semiconductor se denominan *dadores* o *donadores*. Los átomos de las sustancias, que tienen menor valencia que los átomos del semiconductor, poseen capacidad de anexar electrones. Semejantes sustancias se denominan aceptores o aceptadores.

Para obtener un semiconductor que posea solamente electroconductibilidad electrónica se introduce en él una sustancia compuesta de átomos cuya valencia es en una unidad superior a la de los átomos del semiconductor principal. Así, en el germanio Ge, que se compone de átomos tetravalentes, se introduce la sustancia donadora antimonio Sb o el fósforo P, compuesto de átomos pentavalentes (fig. 25). Cuatro electrones de cada uno de los átomos de la sustancia introducida establecen cuatro enlaces covalentes (pares)** con los átomos correspondientes del semiconductor principal, mientras que el quinto electrón queda sin semejante enlace. De esta manera, dicho electrón puede ser pasado fácilmente al estado libre y, bajo el efecto de la tensión aplicada, participará en la formación de la corriente electrónica en el semiconductor (fig. 26).

En la figura se ve que los portadores principales de corriente son los electrones, que componen la conductibilidad eléctrica de la sustancia aleadora. Dos huecos y dos electrones que les corresponden se obtienen como resultado de la ionización de los átomos de germanio. Estos portadores de corriente determinan la conductibilidad eléctrica intrínseca del semiconductor. La corriente total en el semiconductor es igual a la suma de las corrientes electrónica y por huecos, pero la electrónica es mayor que la por huecos en muchas veces.

* En el material semiconductor minuciosamente limpio las impurezas componen no más del 10...11 %.

** Los enlaces covalentes se expresan con líneas dobles, que unen los átomos entre sí (figs. 25 y 27).

Si se introduce en el germanio cualquier sustancia aceptadora, por ejemplo, boro B, cada uno de los átomos de la sustancia establecerá tres enlaces covalentes con los átomos vecinos del germanio. Pero, puesto que el boro tiene sólo tres electrones de valencia, únicamente

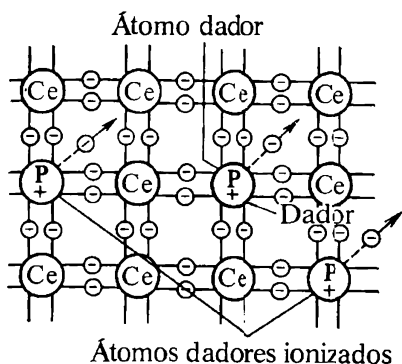


Fig. 25.

Red cristalina del germanio con la sustancia donadora introducida en él (fósforo)

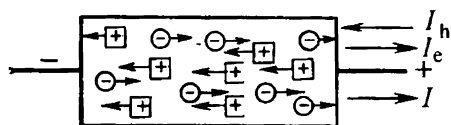


Fig. 26.

Esquema del movimiento de los electrones y de los huecos en el semiconductor con sustancia donadora

puede establecer enlaces con los tres átomos de germanio más próximos. El átomo del boro no tiene electrón para enlazar con el cuarto átomo del germanio. Así pues, en cada uno de varios átomos del germanio habrá un electrón sin enlace covalente. Ahora son suficientes acciones energéticas exteriores no grandes para que estos electrones abandonen sus puestos, formando huecos en el átomo de germanio (fig. 27). Los electrones que se han liberado (2, 4 y 6) de los átomos del germanio se unirán

ahora a los átomos del boro y, por esto, ellos no pueden crear corriente en el semiconductor. Los huecos 1, 3 y 5, que se originaron en los átomos del germanio, permiten que pasen a ellos los electrones de los átomos contiguos donde a su vez surgirán nuevos huecos.

De tal modo, cada hueco surgido, que está cargado positivamente, pasará de un átomo de germanio al otro, de éste al tercero, etc. Bajo la acción de la tensión aplicada este movimiento de los huecos se ordenará, es decir, en el semiconductor surgirá una corriente por huecos debida a las impurezas. Además, en el semiconductor existirá todavía una pequeña cantidad de pares de electrones y huecos libres de los átomos del germanio. Por consiguiente, a la par de la conductibilidad eléctrica debida a las impurezas en el semiconductor existirá una pequeña conductibilidad eléctrica intrínseca. La corriente total en el semiconductor, como antes, será igual a la suma de la corriente electrónica y la por huecos. Pero esta última será considerablemente mayor que la electrónica. En la fig. 28 se expone el esquema del movimiento de los huecos y de los electrones en un semi-

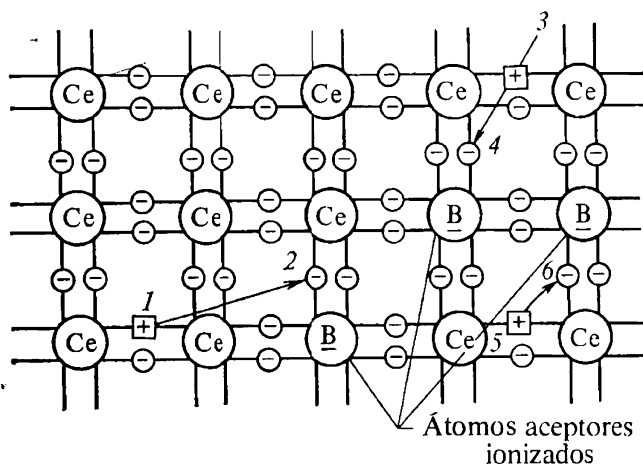


Fig. 27.
Red cristalina del germanio con la sustancia aceptora (boro) introducida en él

conductor con impureza aceptadora. En la figura se ve que el número de partículas cargadas positivamente (huecos) es considerablemente mayor que el de electrones. Los ejemplos examinados demuestran que las impurezas aumentan considerablemente la conductibilidad eléctrica de los semiconductores.

Bajo el influjo de la tensión aplicada los electrones y los huecos, al desplazarse en el semiconductor, encuentran obstáculos de distinto género. Con esto, pierden una parte de la energía y se desvían de su trayectoria, es decir, sucede la dispersión de los portadores de corriente. Ello está provocado, fundamentalmente, por las diferentes impurezas contaminadoras. Cuanto más puro es el semiconductor tanto menor es la dispersión de los portadores de corriente y tanto mayor es la movilidad de los electrones y de los huecos y, por consiguiente, tanto mayor conductibilidad y posee el semiconductor.

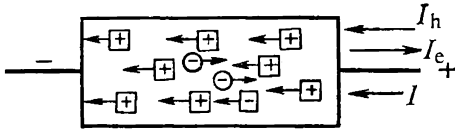


Fig. 28.

Esquema del movimiento de los huecos y de los electrones en un semiconductor con sustancia aceptora

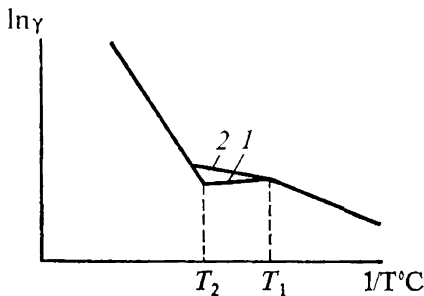


Fig. 29.

Dependencia entre la conductividad del semiconductor y la temperatura:

1, para una concentración pequeña de la impureza aleadora; 2, para una concentración grande de la impureza aleadora

Al elevar la temperatura la conductibilidad de todos los semiconductores aumenta (fig. 29). La conductibilidad crecerá tanto más intensamente cuanto más impureza donadora o aceptadora se haya introducido en el semiconductor.

Hasta la temperatura T_1 en el semiconductor se observa la conductibilidad eléctrica debida a las impurezas, determinada por el movimiento de las cargas de ésta. En el intervalo de temperaturas $T_1 - T_2$ la conductibilidad del semiconductor disminuye un poco. Esto queda provocado por las intensas oscilaciones térmicas de sus átomos, que obstaculizan el desplazamiento de los electrones y huecos libres. Durante la elevación ulterior de la temperatura en el semiconductor se desarrolla su conductibilidad eléctrica intrínseca. Debido a esto surge una gran cantidad de nuevos electrones y huecos, cuyo movimiento dirigido crea una corriente en el semiconductor que crece más y más. Como resultado la conductibilidad específica del semiconductor aumenta bruscamente.

La curva 2 no indica la disminución de la conductibilidad del semiconductor hiperaleado en el intervalo de las temperaturas $T_1 - T_2$. Ello se explica por la gran cantidad de electrones y huecos de la impureza que ingresan en el semiconductor. La participación de estos portadores de corriente de la impureza compensa completamente el incremento de la resistencia del semiconductor en este intervalo de temperaturas. A la temperatura del cero absoluto (-273°C) los electrones no poseen movilidad, es decir, están enlazados rígidamente con sus átomos. Como resultado de ello en el cero absoluto los semiconductores se convierten en dieléctricos.

Una propiedad típica de los semiconductores es la no linealidad de la dependencia entre la corriente en el semiconductor y la tensión aplicada (fig. 30), es decir, la corriente aumenta mucho más rápidamente que la tensión. Simultáneamente con el incremento de la corriente, disminuye bruscamente la resistencia eléctrica del semiconductor. Esta propiedad se utiliza en los descargadores semiconductores valvulares. Dichos descargadores se conectan a los conductores de las líneas de trans-

porte de energía (fig. 31) para protegerlas contra las corrientes grandes cuando cae un rayo. Si la tensión es normal el descargador, por tener una resistencia muy grande, no deja pasar la corriente de la línea a la tierra. Al caer el rayo los conductores se encontrarán bajo la acción de una tensión muy grande, y la resistencia eléctrica del descargador valvular disminuirá bruscamente. Debido a esto el descargador conducirá la corriente grande desde la línea a la tierra, como resultado de lo cual la tensión en la línea de transporte de energía disminuirá hasta el valor normal. La resistencia grande del descargador se restablecerá de nuevo y éste no dejará pasar la corriente de la línea a la tierra.

Al cambiar la tensión U por $-U$ la corriente en el semiconductor irá en dirección contraria y variará según esta misma ley (fig. 32). Esto significa que el semiconductor tiene una *característica tensión-corriente simétrica*.

Si se toman, en cambio, dos semiconductores que se encuentran en contacto ajustado entre sí, con la particularidad de que uno de los semiconductores posee conductibilidad eléctrica tipo n y el otro, la conductibilidad tipo p , entonces semejante sistema tendrá una *característica tensión-corriente asimétrica* (fig. 33). Al pasar la corriente en una dirección el sistema de dos semiconductores poseerá una resistencia muy pequeña, mientras que al pasar la corriente en dirección contraria la resistencia será grande. En el sistema de dos semiconductores con distintos tipos de conductibilidad eléctrica la corriente que pasa en distintas direcciones tendrá diferente magnitud. Con esto, la corriente directa I_d crece rápidamente al aumentar la tensión aplicada. Cuando, por el contrario, a este sistema se aplica la tensión $-U$, la corriente

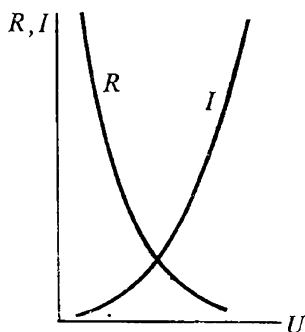


Fig. 30.
Dependencia entre la corriente y resistencia de un semiconductor y la tensión aplicada a él

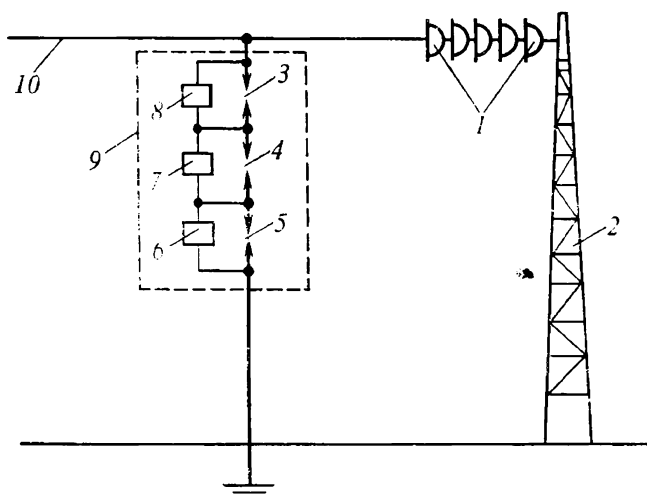


Fig. 31.

Esquema de conexión de un descargador semiconductor valvular en una línea de transporte de energía:

1, aisladores; 2, mástil; 3, 4, 5, intervalos de descarga; 6, 7, 8, elementos semiconductores no lineales; 9, cuerpo del descargador (porcelana); 10, conductor de la línea de transporte de energía

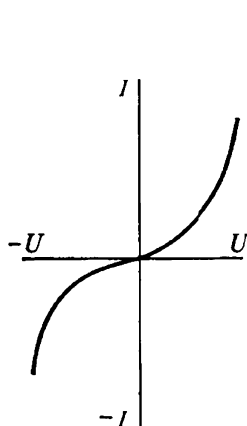


Fig. 32.

Característica simétrica tensión-corriente de un semiconductor

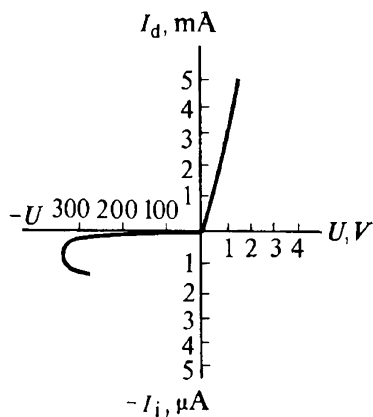


Fig. 33.

Característica asimétrica tensión-corriente de dos semiconductores

de dirección inversa (I_i) prácticamente no pasa al principio por él. Al elevar la tensión inversa aparece una corriente inversa muy pequeña.

De este modo, el sistema de dos semiconductores con distintos tipos de conductibilidad eléctrica no deja pasar la corriente de dirección inversa. Esta propiedad de los semiconductores se utiliza ampliamente en los rectificadores de semiconductor. Al aplicar a semejante sistema de dos semiconductores una tensión inversa grande, en el punto de su contacto tiene lugar una ruptura eléctrica a causa de la disminución brusca de la resistencia.

El lugar de contacto ajustado de dos semiconductores de distinto tipo de conductibilidad eléctrica, denominado *transición p-n*, posee la propiedad de rectificación de la corriente alterna. Al aplicar al sistema de dos semiconductores una tensión alterna la transición *p-n* solamente dejará pasar la corriente de una semionda de la tensión. Esto se puede explicar de la manera siguiente. Cuando al sistema de dos semiconductores no se aplica una tensión exterior, en el semiconductor tipo *n* existe una concentración grande de electrones, mientras que en el semiconductor tipo *p* existe una concentración grande de huecos. Además, en ambos semiconductores existen en pequeñas cantidades portadores de corriente que no son los principales. Así, en el semiconductor tipo *n* existe una pequeña cantidad de huecos, y en el semiconductor tipo *p*, cierta cantidad de electrones.

Durante el contacto ajustado de estos dos semiconductores, efectuado, por ejemplo, mediante la fusión de uno de los semiconductores en el otro, los electrones del semiconductor de tipo *n* difundirán al semiconductor tipo *p*, donde su concentración es muy pequeña. Simultáneamente, los huecos del semiconductor de tipo *p* difundirán al semiconductor tipo *n*, donde su concentración también es muy pequeña. Esta difusión mutua de los huecos y electrones disminuirá la concentración de electrones en la capa límite en el semiconductor tipo *n* y lo rellenará con huecos. Al mismo tiempo, disminuirá la concentración de huecos en la capa límite del semiconductor tipo *p*; esta capa se rellenará de electrones

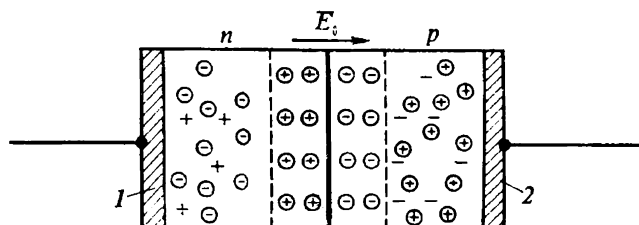


Fig. 34.
Esquema de la formación de la transición $p - n$ de dos semiconductores

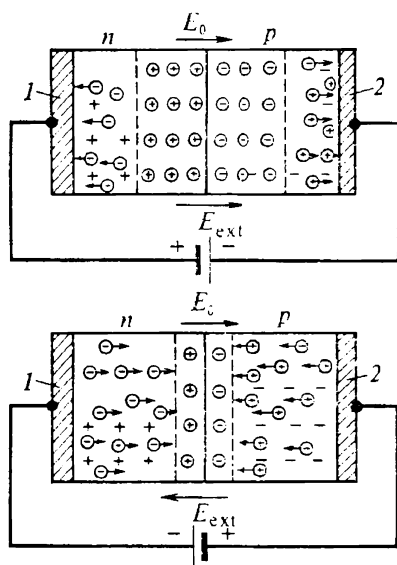


Fig. 35.
Esquema de funcionamiento de la transición $p - n$ de dos semiconductores (diodo plano) al aplicarles tensiones de direcciones inversa (arriba) y directa (abajo)

(fig. 34). De tal modo, antes de aplicar a los electrodos 1 y 2 la tensión exterior, en el límite de los dos semiconductores se crea una capa eléctrica doble. Como resultado de ello aquí surge un campo eléctrico local con intensidad E_0 , dirigido hacia el lado de las cargas negativas en la capa eléctrica doble.

Al aplicar al sistema de dos semiconductores una tensión exterior, como se indica en la fig. 35, cuando la intensidad E_e de la fuente exterior coincida con la intensidad E_0 del campo local, los electrones en el semiconductor tipo n y los huecos en el semiconductor tipo p se desplazarán en la dirección de los electrodos 1 y 2. Como resultado en la transición $p-n$ se ampliarán las esferas de electrones en el semiconductor p y de huecos en el semiconductor n . Por consiguiente, la resistencia eléctrica de la transición $p-n$ aumenta considerablemente, es decir, se crea una capa de barrera y la corriente no pasará por la transición $p-n$. De hecho pasará una corriente de magnitud muy pequeña, determinada por el desplazamiento de portadores casuales de corriente. Esta corriente se denomina inversa.

Cuando E_e esté dirigida contra E_0 el campo local quedará debilitado notablemente, y los electrones en el semiconductor tipo n y los huecos en el semiconductor tipo p comenzarán a desplazarse en la zona de la transición $p-n$. Como resultado la capa de barrera se estrechará, y su resistencia eléctrica disminuirá bruscamente. En este caso la transición $p-n$ dejará pasar a la corriente. Esta corriente se denomina *directa*, y la dirección de esta corriente se denomina *directa* o *de paso*.

La corriente directa es mucho mayor que la reversa. Como se señaló antes el trabajo del rectificador de semiconductor se aprecia por su característica de tensión-corriente (véase la fig. 33). Ésta demuestra que cuando las magnitudes de la tensión son pequeñas la corriente directa, que deja pasar el rectificador, alcanza valores elevados. Por el contrario, al aplicar al rectificador una tensión inversa, cuando el más de la batería está conectado al semiconductor tipo n y el menos está conectado al semiconductor tipo p , prácticamente el rectificador no deja pasar la corriente. Desde 300 V (véase la fig. 33) de la tensión inversa la transición $p-n$ comenzará a dejar pasar a magnitudes muy pequeñas de la corriente inversa. Si se aumenta la tensión inversa, entonces la corriente inversa, desde cierto momento, comenzará a aumentar considerablemente, y puede alcanzar una magnitud con la que tendrá lugar la perforación de la transición $p-n$.

En los diodos semiconductores la transición $p-n$ puede ser ejecutada o en forma de contacto aleado entre dos semiconductores de distintos tipos de conductibilidades eléctricas, o en forma de contacto entre la placa de un semiconductor y una punta metálica. En el primer caso se formará cierta superficie de contacto de los dos semiconductores. Semejantes diodos se denominan *de enlace*. En el segundo caso la placa del semiconductor (germanio o silicio) con dimensión 2×2 mm contacta con la punta de un alambre fino metálico. Semejantes diodos se denominan *de puntas de contacto*. Estos poseen una pequeña capacidad de la transición $p-n$ y se emplean en altas frecuencias.

Estudiemos ahora ciertas propiedades específicas de los semiconductores.

Bajo la acción de la luz la conductibilidad de ciertos semiconductores (por ejemplo, de selenio) puede variar considerablemente. Esto queda determinado por el hecho de que la radiación luminosa de una concreta longitud de onda comunica a los electrones del semiconductor una energía suficiente para que se conviertan en electrones libres. En este caso la resistencia del semiconductor disminuye bruscamente. Esta propiedad de los semiconductores se utiliza en la confección de las resistencias fotosensibles, instrumentos sensibles no sólo al tramo del espectro visible, sino también a la radiación infrarroja.

Durante el alumbrado parcial del semiconductor, cuando en su superficie existen zonas alumbrada y no alumbrada, entre éstas surge una foto-f.e.m. Este fenómeno se utiliza durante la creación de fuentes de energía eléctrica: fotoelementos y pilas solares. Las últimas son capaces de transformar la energía solar directamente en la eléctrica.

Ciertos semiconductores (por ejemplo, el silicio) cambian bruscamente su resistencia eléctrica bajo la acción de la presión a la que se someten (efecto tensorresistivo). Esta propiedad de los semiconductores se emplea durante la fabricación con ellos de medidores sensibles de la presión: captadores tensométricos.

El hecho de que en los semiconductores existen dos zonas con temperaturas distintas provoca el despla-

miento de las cargas libres desde la zona caliente hacia la fría. Así, si los portadores de la corriente son los electrones, entonces éstos, desplazándose a la zona fría, la cargarán con electricidad negativa. La zona caliente del semiconductor, habiendo perdido una parte de los electrones, se cargará positivamente. Como resultado de ello entre las zonas caliente y fría surge una termo-f.e.m. Este fenómeno se utiliza durante la creación de termoelementos y termogeneradores, que son capaces de transformar la energía térmica en la eléctrica.

§ 39. Materiales semiconductores

En la electrotécnica, entre una gran cantidad de materiales de orígenes inorgánico y orgánico de estructuras monocristalina y policristalina, se utilizan principal-

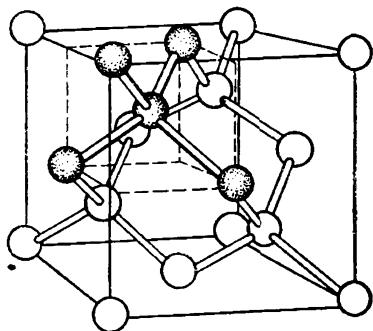


Fig. 36.
Estructura cristalina de tipo de diamante

mente el germanio, el silicio, el seleno y el carburo de calcio. Todos ellos se emplean ampliamente en la fabricación de instrumentos de semiconductores.

El silicio y el germanio pertenecen a los semiconductores semejantes a diamante, pues tienen la estructura cristalina del diamante (fig. 36). Ésta es un cubo en los vértices y en los centros de las caras del cual se disponen los átomos de carbono. Además, los átomos de carbono se encuentran en los centros de cuatro (de los ocho)

cubos pequeños (octantes) en los que se divide el cubo mayor.

En las figs. 25 y 27 se exhibió la imagen plana de la estructura del germanio. En estas figuras se ve que en la estructura de tipo de diamante cada uno de los átomos que se examinan (germanio o silicio) está rodeado por cuatro átomos iguales, dispuestos a una misma distancia del que se examina, y cada uno de ellos forma un enlace covalente con el átomo vecino.

El germanio (Ge) es un elemento del cuarto grupo del sistema periódico de Mendeléiev. Los materiales básicos originales para su obtención son los minerales de zinc y sulfúricos. Como resultado de procesos químicos complejos se obtiene un lingote de germanio, pero éste todavía no se puede utilizar para la fabricación de instrumentos de semiconductores, pues contiene impurezas y no es monocristal. Al principio este lingote se libera de las impurezas con el método de fusión fraccional. En el germanio limpio las impurezas deben componer no más de un $5 \cdot 10^{-9} \%$.

Para obtener germanio monocristalino éste se funde en el vacío o en la atmósfera de un gas inerte. Para obtener germanio de conductibilidad eléctrica tipo *n* o *p* en la masa fundida de germanio puro se introduce, respectivamente, una impureza donadora o aceptadora. Después, de la masa fundida se extrae a una velocidad determinada el germanio monocristalino puro en forma de un cilindro sólido de diámetro prefijado*. El germanio tiene un color plateado vivo, su densidad es de 5322 kg/m^3 y su punto de fusión es de $937,2^\circ\text{C}$. El germanio puro no aleado posee las siguientes características eléctricas: la resistencia eléctrica específica $\rho \cong 0,5\Omega \cdot \text{m}$; $\epsilon = 16,3$. En las clases aleadas de germanio con conductibilidad eléctrica tipo *np* $= 0,008 \dots 0,3\Omega \cdot \text{m}$, y con conductibilidad eléctrica tipo *pp* $= 0,01 \dots 0,06\Omega \cdot \text{m}$. Todas las clases de germanio poseen una gran dureza y fragilidad.

El germanio se utiliza ampliamente para la fabricación de diodos y fotoelementos.

* La obtención de la masa fundida de monocristales de germanio y silicio se efectúa con el método de Chojralski.

El silicio (Si) es un elemento del cuarto grupo del sistema periódico de Mendeléiev. En la naturaleza está difundido ampliamente en forma de sílice (SiO_2), que sirve de una de las sustancias originales para la obtención de clases técnicas de silicio.

Como resultado de la limpieza de los lingotes de silicio con el método de fusión fraccional se obtiene el silicio monocristalino con electroconductibilidad tipo n o p , en dependencia de las impurezas aleadoras introducidas. En el silicio puro las impurezas no deben componer más de un 10^{-11} %.

Las muestras de silicio pulido tienen el color de acero. El silicio, al igual que el germanio, es un material frágil. Las características fundamentales del silicio limpio no aleado son: densidad 2330 kg/m^3 ; el punto de fusión es de 1417°C ; $\rho = 2,30\Omega \cdot \text{m}$; $\varepsilon = 11,7$. En las clases aleadas de silicio con electroconductibilidad tipo n $\rho = 0,003...2\Omega \cdot \text{m}$; con electroconductibilidad tipo p $\rho = 0,06...50\Omega \cdot \text{m}$.

El silicio se utiliza más ampliamente que el germanio, ya que el límite superior de la temperatura de trabajo de los instrumentos de semiconductores a base del silicio es de 180 a 200°C , mientras que a base del germanio ésta es de 80 a 100°C . Además, el silicio se emplea en los esquemas integrales de semiconductores en la radioelectrónica.

El selenio (Se) es un elemento del sexto grupo del sistema periódico de Mendeléiev. Los materiales originales para su obtención son los residuos que se consiguen durante la refinación electrolítica del cobre. El selenio sólido puede tener una estructura amorfa o cristalina. El selenio negro amorfo se obtiene del selenio limpio fundido al enfriarlo hasta la temperatura ambiente. Éste representa un dieléctrico con resistencia específica $\rho = 10^{11}\Omega \cdot \text{m}$.

El selenio cristalino gris se obtiene del selenio amorfo fundido durante su enfriamiento lento desde el punto de fusión (220°C) hasta la temperatura ambiente. El selenio cristalino es semiconductor de impurezas tipo p con $\rho = 10^3\Omega \cdot \text{m}$ y tiene una estructura semicristalina. Las características fundamentales del selenio son:

densidad 4800 kg/m^3 ; el punto de fusión es de 217°C ; $\rho = (0,8 \div 5) \cdot 10^3 \Omega \cdot \text{m}$; $\epsilon = 6,3$. El intervalo de temperaturas de trabajo del selenio en los rectificadores es desde -60 hasta 75°C .

El selenio se emplea para la fabricación de rectificadores de selenio, fotoelementos y resistencias fotosensibles.

El carburo de silicio (SiC) es un material frágil de estructura (semicristalina con dependencia no lineal expresada bruscamente entre la corriente y la tensión (véase la fig. 30). Éste se forma como resultado de la combinación química del silicio y del carbono. Los materiales iniciales para su obtención son la arena de cuarzo pura y el coque. Para obtener la conductibilidad eléctrica debida a las impurezas de uno u otro tipo, en la composición original (carga) se introduce la impureza: el fósforo, el antimonio, el bismuto, el magnesio, el aluminio y otros. La reacción de formación del carburo de silicio se efectúa a una temperatura final de 2000°C aproximadamente.

El carburo de silicio aleado con fósforo, antimonio o bismuto, tiene un color violeta oscuro y posee conductibilidad eléctrica tipo *p*. Las características fundamentales del carburo de silicio son: densidad 3200 kg/m^3 ; el punto de fusión es de 2700°C ; $\rho = 10^2 - 10^3 \Omega \cdot \text{m}$; $\epsilon = 6,5 \dots 7,5$. Igual que el selenio cristalino el carburo de silicio es un semiconductor de impurezas, pero a la temperatura de 1400°C y más en él aparece una conductibilidad eléctrica intrínseca.

La esfera fundamental de aplicación de las clases más puras de carburo de silicio es la fabricación de varistores, que poseen una característica tensión-corriente simétrica y que pueden trabajar en un intervalo de temperaturas desde -50 hasta $+80^\circ\text{C}$. Los varistores se emplean en los dispositivos de regulación automática.

Del carburo semicristalino de silicio se pueden obtener con el método de sublimación en un gas inerte los monocristales de carburo de silicio, que se distinguen por su pureza química. Estos se emplean ampliamente para la confección de diodos y transistores para temperaturas de trabajo de hasta 700°C , y asimismo para la producción de diodos luminiscentes.

Semejantes acciones externas como son la humedad y las radiaciones ambientales empeoran en grado considerable las características de los instrumentos de semiconductores. Por esto, para protegerlos contra las acciones exteriores, se colocan en cuerpos herméticos metálicos, cerámicos o de plástico.

Preguntas de control

1. Enumere las propiedades típicas de los semiconductores.
2. ¿Qué representan las electroconductibilidades intrínseca y debida a las impurezas de los semiconductores?
3. ¿Qué es la transición $p-n$?
4. ¿Cuáles son la estructura y las propiedades fundamentales del germanio y del silicio?
5. ¿Cuáles son la estructura y las propiedades fundamentales del selenio?
6. ¿Cuáles son la composición y las propiedades fundamentales del carburo de silicio?
7. ¿En qué fabricación de instrumentos se emplean los materiales semiconductores?

Capítulo VI

Materiales magnéticos

§ 40. Características fundamentales

Se denominan *magnéticos* aquellos materiales que, bajo el influjo del campo magnético exterior, son capaces de magnetizarse, es decir, adquirir propiedades magnéticas especiales.

Los materiales magnéticos principales son el hierro, el níquel, el cobalto y diferentes aleaciones a base del hierro puro técnicamente. Las propiedades de los materiales magnéticos se valoran con ayuda de magnitudes denominadas *características magnéticas*. Las principales de ellas son las siguientes.

La permeabilidad magnética (permeabilidad magnética relativa o permeabilidad) μ . Esta es una magnitud adimensional. Entra en la expresión de la permeabilidad magnética absoluta, H/m,

$$\mu_a = \mu_0 \mu, \quad (19)$$

donde μ_0 es una constante magnética, igual a $1,256637 \cdot 10^{-6}$ H/m.

La permeabilidad magnética es una magnitud que determina la capacidad del material a magnetizarse. Cuanto mayor sea la magnitud μ tanto más fácilmente se magnetizará el material y, por el contrario, cuanto menor sea la magnitud μ tanto en menor grado podrá ser magnetizado este material. La permeabilidad magnética depende en alto grado de la intensidad H , que actúa en el material (fig. 37). Por esto, para la valoración de la capacidad del material a magnetizarse, se debe tener en cuenta la permeabilidad magnética inicial μ_1 y la permeabilidad magnética máxima μ_m .

Cuanto mayores sean los valores de estas características en el material dado tanto más fácilmente se magnetizará éste. Cualquier material magnético posee propiedades magnéticas solamente hasta una temperatura

determinada (temperatura de Curie θ_c) al alcanzar la cual en el material desaparecen las propiedades magnéticas, es decir, este material no puede ser magnetizado. Ello queda determinado por la desorientación de las zonas internas (dominios) de magnetización provocada por

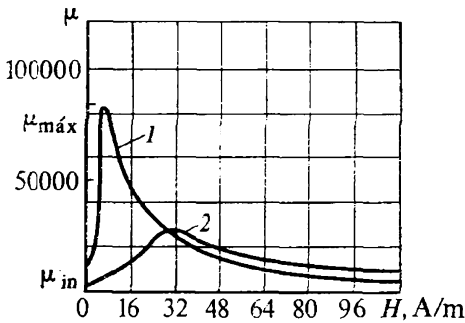


Fig. 37.

Dependencia entre la permeabilidad magnética y la intensidad del campo magnético:

1, permaleación; 2, hierro puro ($\text{Fe} = 99.98\%$)

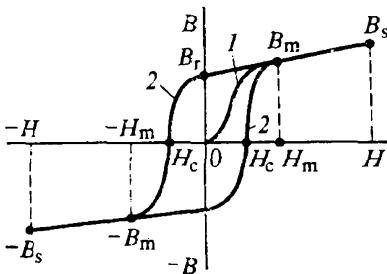


Fig. 38.

Curva inicial de magnetización (1) y el bucle de histéresis (2)

el movimiento térmico intenso de sus átomos y moléculas. En ciertos ferritos las propiedades magnéticas desaparecen cuando $\theta_c = 45^\circ\text{C}$, pero existen materiales en los que $\theta_c = 1131^\circ\text{C}$ (cobalto).

La inducción de saturación B_s . La conducta del material magnético en un campo magnético se caracteriza por la curva inicial de magnetización (fig. 38). Esta curva

indica el cambio de la inducción magnética B en el material magnético en dependencia de la intensidad H . Del estudio de la curva se deduce que la inducción magnética al principio crece, luego su incremento disminuye, y al alcanzar la magnitud B_s la inducción permanece constante. Se dice que el material magnético alcanzó su saturación, y la inducción B_s se denomina *inducción de saturación*. Cuanto mayor es la magnitud B_s , tanto más altas son las propiedades del material magnético. La inducción magnética se mide en teslas (T).

Inducción magnética residual B_r y fuerza coercitiva H_c . Si se magnetiza la muestra de material magnético aumentando continuamente la intensidad H del campo magnético, entonces la inducción magnética B crecerá también continuamente por la curva de magnetización. Esta curva comienza en el punto 0 (fig. 38) y termina en el punto que corresponde a la inducción de saturación B_s . Al disminuir la intensidad H la inducción magnética también disminuirá, pero comenzando desde la magnitud B_m los valores de la inducción no coincidirán con los de esta característica en la curva inicial de magnetización, y cuando la intensidad del campo magnético se hace igual a cero en la muestra del material magnético se observará la *inducción magnética residual B_r* . Para la desmagnetización de la muestra del material es necesario que la intensidad del campo magnético cambie su dirección por la opuesta ($-H$). La intensidad H_c del campo durante la cual la inducción se hace nula se denomina *fuerza coercitiva*.

Si después de esto la muestra del material magnético se magnetiza aun más en la dirección contraria, entonces en éste se observará de nuevo la inducción de saturación ($-B_s$). Durante la disminución ulterior de la intensidad del campo magnético hasta la magnitud $H = 0$ y una nueva magnetización en la dirección inicial la inducción aumentará continuamente hasta la magnitud de la inducción de saturación B_s . Como resultado se forma un lazo cerrado que se denomina, o *bucle estático* o *límite de histéresis*. El bucle límite de histéresis se elimina durante el cambio lento del campo magnético continuo desde $+H$ hasta $-H$, cuando la magnitud de la

inducción magnética se hace igual a la de saturación B_s .

El coeficiente α_r de rectangularidad del bucle de histéresis caracteriza el grado de rectangularidad del bucle límite de histéresis (fig. 33) y se calcula por la fórmula

$$\alpha_r = B_r/B_m.$$

Cuanto mayor es la magnitud α_r tanto más rectangular es el bucle de histéresis. En los materiales magnéticos que se emplean para las memorias en las calculadoras electrónicas $\alpha_r = 0.98$ y en otros materiales es considerablemente menor.

Hasta ahora estudiamos la magnetización de los materiales en un campo magnético continuo. Al actuar sobre el material un campo magnético alternativo se obtiene la curva dinámica de magnetización y el bucle dinámico de histéresis. La relación entre los valores de la inducción y la magnitud del campo magnético en la curva dinámica es *permeabilidad magnética dinámica*

$$\tilde{\mu} = B_{\text{ampl}}/H_{\text{ampl}}.$$

Cuando las frecuencias son bajas y el espesor del material magnético es pequeño la curva dinámica de magnetización coincide con la curva estática. Con esto los valores de la permeabilidad magnética dinámica prácticamente coinciden con los de la permeabilidad calculados por la curva estática de magnetización. El bucle dinámico de histéresis tiene una superficie un poco mayor que el estático, pues durante la acción del campo magnético alternativo en el material, además de las pérdidas de histéresis, existen pérdidas por corrientes parásitas y de remanencia magnética.

Las pérdidas de energía por corrientes parásitas P_p dependen de la resistencia eléctrica ρ del material magnético. Cuanto ésta sea mayor tanto menores serán las pérdidas por corrientes parásitas. Las pérdidas por corrientes parásitas, en W/kg, son proporcionales a los cuadrados de la inducción magnética B_m y a la frecuencia f^2 del campo magnético alternativo. Así, para el material magnético en chapa las pérdidas en el campo

alternativo se calculan según la expresión

$$P_p = 164 \cdot h^2 B_m^2 f^2 / \gamma, \rho, \quad (20)$$

donde h es el espesor de la chapa, m; B_m es el valor máximo de la inducción magnética, T; f es la frecuencia, Hz; γ es la densidad del material, kg/m³; ρ es la resistencia eléctrica específica, $\Omega \cdot m$.

Energía específica volumétrica W . Si del bucle de histéresis antes examinado se separa la parte izquierda superior (fig. 39) y en la parte derecha señalamos los valores

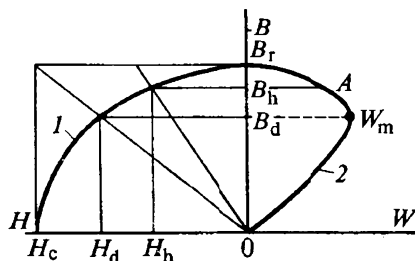


Fig. 39.

Curva de desmagnetización (1) y curva de la energía específica magnética volumétrica (2) de un imán abierto

iguales a la mitad del producto de la inducción magnética por la intensidad correspondiente, entonces obtendremos la curva A de la energía específica volumétrica. Ésta es la magnitud de la energía, creada por un imán permanente en un espacio de aire (entre sus polos), referida a la unidad de su volumen, J/m³.

La característica magnética del material es la magnitud máxima de la energía específica volumétrica, J/m³,

$$W_m = B_d H_d / 2, \quad (21)$$

donde B_d es la inducción que corresponde al valor máximo de la energía específica volumétrica; H_d es la intensidad del campo magnético, que corresponde al valor máximo de la energía específica volumétrica.

§ 41. Clasificación de los materiales magnéticos

Según sea su comportamiento en el campo magnético todos los materiales magnéticos se dividen en dos grupos fundamentales: magnéticamente blandos y magnéticamente duros.

Los materiales magnéticamente blandos poseen valores grandes de permeabilidades magnéticas inicial y máxima y valores pequeños de la fuerza coercitiva ($H_c \leq 40$ A/m). Estos materiales se magnetizan y desmagnetizan con facilidad. Se distinguen por sus pequeñas pérdidas de histéresis, es decir, a dichos materiales les corresponde un bucle estrecho de histéresis.

El nivel de las características magnéticas de los materiales magnéticamente blandos depende de su pureza química y del grado de distorsión de su estructura cristalina. Cuanto menor sea la cantidad de distintas impurezas en el material magnéticamente blando tanto mayor será el nivel de sus características, es decir, tanto mayores serán μ_i y μ_m y tanto menores serán H_c y las pérdidas de histéresis. Por esto, durante la fabricación de materiales magnéticamente blandos se procura eliminar en ellos las impurezas más nocivas: el carbono C, el fósforo P, el azufre S, el oxígeno O_2 , el nitrógeno N_2 y distintos óxidos. Al mismo tiempo se procura no desfigurar la estructura cristalina del material y no provocar en él tensiones internas. Con los materiales magnéticamente blandos se fabrican núcleos de máquinas eléctricas, transformadores, relé y otros aparatos eléctricos.

Los materiales magnéticamente duros poseen una fuerza coercitiva grande ($H_c \geq 40$ A/m) y una inducción remanente grande ($B_r \geq 0,1$ TI). A éstas les corresponde un bucle amplio de histéresis. Estos materiales se magnetizan con dificultad, y una vez magnetizados, pueden conservar la energía magnética durante algunos años, es decir, servir de fuentes de campo magnético continuo. Los materiales magnéticamente duros se emplean, fundamentalmente, para la fabricación de imanes permanentes.

Según su composición todos los materiales magnéticos se dividen en metálicos y no metálicos. A los materia-

les magnéticos metálicos pertenecen los metales puros (hierro, cobalto, níquel) y las aleaciones magnéticas de ciertos metales, y a los materiales no metálicos pertenecen las ferritas.

§ 42. Materiales metálicos magnéticamente blandos

Los principales materiales metálicos magnéticamente blandos, que se emplean en la electrotécnica, son la permaleación, los alsíferos y los aceros siliciosos de baja aleación.

Las permaleaciones son aleaciones plásticas de hierro y níquel cuyo contenido es desde 36 hasta 80 %. Con el fin de mejorar unas u otras propiedades en estas aleaciones se introduce molibdeno, cromo o cobre, obteniendo así las permaleaciones aleadas. Las permaleaciones que contienen de 36 a 50 % de níquel se denominan pobres en níquel, y si su contenido es de 60 a 80 % son ricas en níquel.

Todas las permaleaciones se caracterizan por el nivel alto de las características magnéticas (tablas 20 y 21).

Tabla 20. Características fundamentales de las permaleaciones no aleadas

Contenido de níquel, %	μ_1	μ_{10}	H_c , A/m	ρ , $\mu\Omega \cdot m$
78,5	10 000...14 000	130 000...220 000	1...3	0,25
66	3 000...4 000	120 000...200 000	3...5	0,32
50	2 000...3 000	50 000...70 000	6...9	0,45

Esto se garantiza no sólo por su composición y por la pureza química de la aleación, sino también por la elaboración térmica especial. Ésta consiste en el calentamiento a la velocidad de 400 a 500 °C por hora, duración del calentamiento de la aleación a 1000...1150 °C durante 3...6 horas y un enfriamiento ulterior a la velocidad de 100 a 200 °C por hora hasta la temperatura ambiente. Ciertas permaleaciones requieren un calentamiento reite-

Tabla 21. Características fundamentales de las permaleaciones aleadas

Contenido de níquel, %	Contenido de elementos aleadores, %	μ_i	μ_m	H_c , A/m	ρ , $\mu\Omega \cdot m$
78,5	3,8 Mo	25 000	150 000	1,0	0,55
68	2 Mo	7 000	120 000	0,7	0,48
5,0	4 Cr	3 000	30 000	8	0,95

rado hasta 600 °C y un enfriamiento rápido a una velocidad de 150 °C por minuto.

Las mejores características magnéticas de las permaleaciones se logran durante su recocido en el vacío.

De las tablas 20 y 21 se deduce que las permaleaciones aleadas poseen valores máximos de resistencia eléctrica específica y, por consiguiente, pequeñas pérdidas por corrientes parásitas. Estas permaleaciones poseen también valores elevados de las características magnéticas.

Todas las clases de permaleaciones son sensibles a las deformaciones mecánicas del material: endurecimiento durante el corte, estampado y otras acciones mecánicas. Por esto, las piezas de permaleaciones, obtenidas con estos procedimientos, se someten a un tratamiento térmico complementario: al recocido.

Las permaleaciones se suministran en forma de bandas de acero de 0,002 a 0,5 mm de espesor, chapas de 1 a 2 mm y barras de 5 a 50 mm de diámetro y más. Las permaleaciones pobres en níquel se emplean para la fabricación de núcleos de bobinas, transformadores de pequeñas dimensiones y amplificadores magnéticos, mientras que las permaleaciones ricas en níquel se emplean para fabricar piezas de aparatos que trabajan en frecuencias algo superiores a las audibles. Las características magnéticas de las permaleaciones son estables en el intervalo de temperaturas desde -60 hasta +60 °C.

Los alsiferes son aleaciones no maleables, frágiles, que se componen de 5,5 a 13 % de aluminio, de 9 a 10 % de silicio, y el resto es hierro. Las clases industriales de alsifer tienen las siguientes características: $\mu_i = 6000...$

...7000; $\mu_m = 30\,000 \dots 35\,000$; $H_c = 2,2 \text{ A/m}$; $\rho = 0,8 \mu\Omega \cdot \text{m}$. Los alsiferes se destinaban para sustituir las permaleaciones, que son caras, pero sustituyeron a éstas solamente en una esfera relativamente limitada de aplicación. Con alsifer se fabrican núcleos fundidos que trabajan en un diapasón de frecuencias no superiores a 20 kHz, ya que a frecuencias mayores en éstos surgen pérdidas grandes por corrientes en torbellino. Con el alsifer se funden piezas huecas con espesor de las paredes no menor de 2 mm.

Los aceros electrotécnicos siliciosos son pobres en carbono* en los que se introduce desde 0,8 hasta 4,8 % de silicio con el fin de mejorar las propiedades magnéticas del acero. El silicio, que se encuentra en el acero en estado disuelto, reacciona con el óxido ferroso FeO . Con esto, del acero se desprende el hierro puro y se forma el silicio $2\text{FeO} + \text{Si} \rightarrow 2\text{Fe} + \text{SiO}_2$.

El sílice aumenta la resistividad del acero, lo que disminuye las pérdidas por corrientes de Foucault. El silicio provoca la desintegración de la cementita Fe_3C , impureza nociva en el acero que rebaja considerablemente sus características magnéticas. El silicio también contribuye al crecimiento de los cristales de hierro, lo que eleva el nivel de las características magnéticas del acero. La introducción en el acero de mayores cantidades de silicio mejora todas las características magnéticas, pero provoca una fragilidad mayor, que excluye la fabricación de piezas estampadas de acero. Por esto, en el acero se introduce silicio en cantidad que no exceda el 4,8 %.

Las chapas de acero silicioso se fabrican laminando tochos en estado caliente o no caliente, por lo que se distinguen el acero silicioso de laminación en caliente y el de laminación en frío. Como es sabido el hierro tiene una estructura cúbica de los cristales. Éste se magnetiza más intensamente cuando la dirección del campo magnético coincide con la de la arista del cubo de cristal. Por esto, para la mejoración de las propiedades magnéticas, las chapas de acero electrotécnico se laminan en estado

* En los aceros electrotécnicos el contenido de carbono no excede de 0,04 % de la masa.

frío en una misma dirección, después de lo cual se recuece en una atmósfera de hidrógeno a 900 °C. Al laminar las chapas de acero en una misma dirección los cristales de hierro están orientados, fundamentalmente, en la dirección del laminado. Durante el recocido ulterior de las chapas de acero se eliminan las impurezas, que rebajan las propiedades magnéticas del material (carbono, oxígeno) y además, los cristales de hierro, deformados por la laminación, adquieren la forma anterior.

Los aceros siliciosos de laminación en frío, en los que los cristales de hierro están dispuestos preponderantemente en la dirección del laminado, se denominan aceros de textura orientada*. Las ventajas de los aceros de laminación en frío en comparación con los de laminación

en caliente se ven en la tabla 22 y en la fig. 40.

En los aceros de laminación en frío se observan características magnéticas mejoradas solamente cuando coinciden la dirección del flujo magnético con la del laminado. Cuando la dirección del flujo magnético es otra, las magnitudes de todas las características magnéticas en los aceros de textura orientada laminados en frío son menores que en los de laminación en caliente. Por esto, lo más racional es el emplear los aceros de laminación en frío en los núcleos de devanado de cinta y otras estructuras en donde la dirección del campo magnético coincide con la del laminado.

El acero electrotécnico se lamina en chapas y cintas

* Aceros de laminación en frío con estructura anisótropa (de canto).

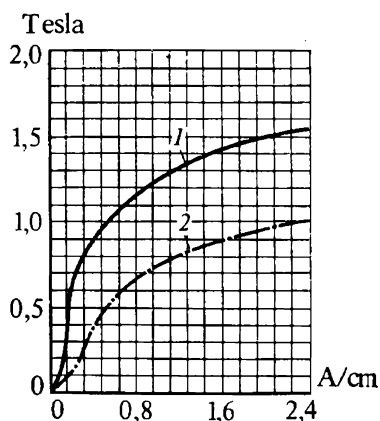


Fig. 40. Curvas de magnetización de los aceros al silicio:

a, acero 3414, de laminación en frío; b, acero 1511, de laminación en caliente

Tabla 22. Características fundamentales de los aceros siliciosos de alta aleación

Contenido de silicio, en %	Carácter del laminado	μ_1	μ_m	H_c , A/m
4	Laminado en caliente	300...400	6000...8000	31...33
3,8	Laminado en frío	600...900	20000...35000	9,5...14

con espesor desde 0,05 hasta 1,5 mm y es un material accesible y barato. Para los núcleos de las máquinas eléctricas, que tienen forma redonda, se utilizan aceros de laminación en caliente o de laminación en frío de poca texturización. Estos últimos poseen mejores propiedades magnéticas en comparación con los aceros laminados en caliente.

§ 43. Materiales metálicos magnéticamente duros

Los materiales magnéticamente duros se emplean para la fabricación de imanes permanentes y otras piezas. La primera exigencia que se presenta a los imanes permanentes consiste en el hecho de que éstos deben crear en el espacio de aire entre sus polos un campo magnético con intensidad e inducción magnética constantes por su magnitud. El imán permanente debe poseer una gran energía magnética, es decir, los materiales magnéticos duros deben tener una fuerza coercitiva y una inducción magnética residual que sean lo posiblemente mayores.

En cualquier imán permanente, con el transcurso del tiempo, disminuye el flujo magnético y, por consiguiente, la energía magnética específica. Este proceso se denomina *envejecimiento del imán*. Uno de los tipos de envejecimiento comienza como resultado de las vibraciones, golpes, cambio brusco de la temperatura del imán. A semejante imán se le pueden recuperar las propiedades magnéticas anteriores mediante una magnetización reiterada. Otro tipo de envejecimiento está ligado al cambio de la estructura del material magnético duro, por lo que

es irreversible. La segunda exigencia que se presenta a los materiales magnéticamente duros es su resistencia al envejecimiento.

Los materiales metálicos magnéticamente duros se pueden dividir en tres grupos fundamentales: aceros martensíticos altos en carbono; aleaciones a base del hierro-aluminio-níquel y metalocerámicos.

Aceros martensíticos. La estructura martensítica en los aceros altos en carbono se obtiene mediante su temple: un calentamiento hasta la temperatura en la que el acero representa una disolución de carbono en el hierro (austenita) y un enfriamiento ulterior brusco en agua o aceite. En la estructura martensítica los cristales de hierro desfiguran mucho: se alargan, y la parte de la disolución de carbono que queda, provoca tensiones internas. Todo ello garantiza una dureza magnética a los imanes permanentes, fabricados de aceros martensíticos.

En calidad de aceros martensíticos se emplean los aceros al cromo, al tungsteno y al cobalto. En los aceros al cromo, en calidad de componente de aleación, se introduce cromo (1,3...3,6 %), en los aceros al tungsteno se introduce un 5,5...6,5 % de tungsteno, y en los aceros al cobalto se introducen 5...17 % de cobalto, 1,2...1,7 % de molibdeno y 6...10 % de cromo. Todos estos aceros contienen 0,9...1,1 % de carbono, y lo restante es hierro.

Los imanes permanentes se fabrican de barras y cintas de aceros martensíticos de forjado o estampado en caliente. Después del mecanizado éstos se templean a la martensita, y después se magnetizan. Para la estabilización de las características magnéticas todos los imanes se someten a un envejecimiento artificial.

Las características magnéticas fundamentales de los imanes de acero son: de los aceros al cromo $B_r = 0,90$ T; $H_c = 4400$ A/m; de los aceros al tungsteno $B_r = 1$ T; $H_c = 4800$ A/m; de los aceros al cobalto $B_r = 0,3...$...0,9 T; $H_c = 11000...13500$ A/m. Los mejores materiales son los aceros al cobalto, pero son considerablemente más caros que los aceros al cromo y al tungsteno. Todos los aceros encuentran empleo limitado debido al nivel poco elevado de sus características magnéticas.

Aleaciones hierro—níquel—aluminio. Las aleaciones de esta composición, aleadas con cobalto, titanio o niobio y sometidas a un tratamiento térmico especial, poseen un alto nivel de las características magnéticas: $B_r = 0,5...1,40$ T; $H_c = (42...200) \cdot 10^3$ A/m. Estas aleaciones se designan con las marcas: ЮНД8, ЮНДК15; ЮН13ДК24; ЮНДК34ТБ; ЮНАК35Т5 y otras*. Las letras indican los componentes, que entran en la composición de las aleaciones a base del hierro; Ю (Yu), aluminio; Н (N), níquel; Д (D), cobre; К (K), cobalto; Т (T), titanio; Б (B), niobio. Con estas aleaciones no maleables se pueden obtener imanes permanentes solamente con el método de fundición con un tratamiento ulterior de éstos mediante el rectificado.

El alto nivel de las características de la dureza magnética de los imanes de estas aleaciones se alcanza mediante un tratamiento térmico especial, que consiste en lo siguiente. Al comienzo se efectúa un calentamiento de los imanes hasta la temperatura de 900 a 1200 °C con un enfriamiento ulterior en el aire o en el agua. Con esto, todos los componentes de la aleación (aluminio, níquel y otros) estarán diluidos en el hierro, formando una disolución sobresaturada. Con el transcurso del tiempo los componentes de la aleación comienzan a precipitarse en forma de partículas de dispersión fina. Estas últimas provocan tensiones internas en los cristales de hierro, lo que garantiza al material un alto nivel de dureza magnética. Para acelerar este proceso se efectúa el revenido del imán forjado, es decir, éste se calienta hasta la temperatura de 500 a 650 °C, a la que comienzan a precipitarse los componentes diluidos en el hierro. Con ello se observa la velocidad crítica de enfriamiento: 15...20 °C por segundo. El proceso descrito del tratamiento térmico de los imanes de estas aleaciones, denominado *endurecimiento por precipitación* se compone de dos etapas: temple y revenido**.

* Más detalladamente véase *Nikulín N. V.* «Prontuario del joven eléctrico respecto a materiales y artículos electrotécnicos.» Vysshaya shkola, 1982 (en ruso).

** El régimen exacto de tratamiento térmico de los imanes se determina por la composición de la aleación.

El nivel de las características magnéticas de las aleaciones con contenido de cobalto desde 15 % y más se puede elevar mediante el tratamiento termomagnético de los imanes fundidos. Para ello el imán se calienta hasta 1300 °C y se enfría en un campo magnético fuerte a una velocidad de 10 a 15 °C por segundo. Como resultado de la orientación de los dominios magnéticos en la dirección de la acción del campo magnético exterior, los imanes enfriados adquieren una textura magnética. Como resultado su energía magnética aumenta por término medio en un 60...80 % a cuenta del incremento brusco de la inducción magnética remanente. Después del temple de los imanes en el campo magnético exterior éstos se someten a un revenido, es decir, a un calentamiento reiterado hasta 600 °C y a un enfriamiento a una velocidad óptima (15...20 °C/s).

Los imanes de estas aleaciones son mucho más resistentes al envejecimiento que los aceros martensíticos. Es un defecto de estas aleaciones el hecho de que ellas, debido a su gran dureza y fragilidad, no son accesibles a los métodos ordinarios de tratamiento mecánico. Los imanes de estas aleaciones solamente se pueden elaborar con rectificado.

Materiales metalocerámicos no maleables. En la producción en gran escala los imanes de dimensiones muy pequeñas o de forma complicada se procuran fabricar de materiales metalocerámicos. Estos materiales se obtienen de polvos metálicos, que se toman en correlaciones que garantizan la dureza magnética a los imanes después de su prensado y sinterización ulterior a temperaturas elevadas. Los imanes metalocerámicos se fabrican a base de polvos de aleaciones: hierro—níquel—aluminio o hierro—níquel—aluminio—cobalto. Los metales puros o sus aleaciones se trituran hasta partículas con dimensión de 10 a 75 µm. Los imanes se prensan de masa de partida pulverulenta a presiones de $(10...15) \cdot 10^5$ N/m². Los imanes prensados se aglutinan en una atmósfera protectora o en el vacío a 1100...1300 °C. Los imanes aglutinados se templan, y después se efectúa su revenido, enfriándolos a una velocidad dada. Los imanes en cuya composición entra el cobalto se someten a un tratamiento termo-

magnético bajo la acción de un campo magnético exterior. Esto mejora notablemente sus características magnéticas (B_r y H_c).

Los imanes metalocerámicos acabados tienen una porosidad pequeña (2...5 %), que empeora un poco sus características magnéticas. La limpieza de su superficie, que no requiere elaboración complementaria, y la precisión de las dimensiones dadas son cualidades de los imanes metalocerámicos. Los imanes de materiales metalocerámicos pueden elaborarse solamente con rectificado.

§ 44. Ferritas

Las ferritas se fabrican de una mezcla pulverulenta compuesta de óxido de hierro y de óxidos de otros metales seleccionados especialmente. Los artículos de ferrita prensados se someten a sinterización a temperaturas elevadas. El nombre de la ferrita queda determinado por el nombre del metal divalente o (más raramente) monovalente cuyo óxido entra en la composición de la ferrita. Así, si en la composición de la ferrita entra el óxido de zinc ZnO , entonces la ferrita se denomina ferrita de zinc, y si es el óxido de níquel NiO entonces la ferrita es de níquel, etc.

Las ferritas en cuya composición, además del óxido de hierro Fe_2O_3 , entra solamente un óxido de otro metal se denominan simples. La fórmula química de la ferrita simple, en su aspecto general, se escribe así: MeOFe_2O_3 o MeFe_2O_4 , donde Me es la designación del metal cuyo óxido entra en la composición de la ferrita.

No todas las ferritas simples poseen propiedades magnéticas. Así, las ferritas de zinc ZnFe_2O_4 y de cadmio CdFe_2O_4 son sustancias amagnéticas. La existencia o ausencia de propiedades magnéticas en las ferritas simples quedan determinadas por su estructura cristalina.

Las ferritas compuestas o mezcladas, que son disoluciones de una ferrita simple en otra, poseen las mejores características magnéticas. En este caso se pueden utilizar las ferritas amagnéticas en combinación con las ferritas magnéticamente simples. Por ejemplo, la disolución sólida de dos ferritas simples, de zinc y de níquel, forma una ferrita mixta de níquel—zinc. La fórmula quí-

mica de esta ferrita es: $\text{Ni}_x\text{Zn}_{(1-x)}\text{Fe}_2\text{O}_4$.

En la fórmula expuesta x señala la fracción molar* del contenido en este material de óxido de níquel, y $(1 - x)$ es la parte molar del óxido de zinc, con la particularidad de que la suma de estas partes es igual a la unidad.

Las ferritas se fabrican según la tecnología cerámica, es decir, los materiales originales de óxidos pulverulentos de metales, tomados en una correlación determinada, se desmenuzan en molinos de bolas. Con esta mezcla de polvos finamente molidos se prensan las briquetas que se someten a una calcinación inicial en hornos. Las briquetas sinterizadas se muelen y en el polvo de dispersión fina se introduce cualquier plastificador, por ejemplo, disolución de polialcohol vinílico. De la masa obtenida se prensan los artículos de ferrita: núcleos, anillos, que se calcinan a $1000\ldots 1400^\circ\text{C}$. Los artículos sólidos y frágiles que se obtienen son, preponderantemente, de color negro y se pueden elaborar solamente con el rectificado. En calidad de materiales magnéticamente blandos se emplean ampliamente las ferritas mixtas magnéticamente blandas: de níquel—zinc, de manganeso—zinc, de litio—zinc. Las designaciones convencionales de las ferritas son: HH (NN), las ferritas de níquel—zinc de frecuencias bajas, HM (NM) las ferritas de manganeso—zinc, BT (VT), las ferritas con bucle rectangular de histéresis. Las cifras que están delante de las designaciones literales representan el valor medio de la permeabilidad magnética inicial. Por ejemplo: 4000 HM es una ferrita de manganeso—zinc con permeabilidad inicial igual a 4000.

Las características fundamentales de las ferritas son: densidad $3800\ldots 5000\text{ kg/m}^3$. El coeficiente térmico de dilatación lineal es de $(5\ldots 12)\cdot 10^{-6}\text{ }1/^\circ\text{C}$. Las características magnéticas y eléctricas de las ferritas de níquel—zinc son: $\mu_i = 35\ldots 2400$; $\mu_m = 520\ldots 7000$; $H_c = 9\ldots 54\text{ A/m}$; $B_r = 0,06\ldots 0,78\text{ T}$; $\rho = 10^2\ldots 10^8\Omega\cdot\text{m}$; las características de las ferritas de manganeso—zinc son $\mu_i = 550\ldots 8000$; $\mu_m = 2000\ldots 10000$; $H_c = 0,06\ldots$

* La fracción molar es la cantidad del óxido dado, en kg, que corresponde a su masa molecular.

...0,96 A/m; $\rho = 10^{-1} \dots 10^2 \Omega \cdot \text{m}$; $B_r = 0,03 \dots 0,14$ T.

La estabilidad de las características magnéticas en un amplio diapasón de frecuencias, las pequeñas pérdidas por corrientes en torbellinos y la simpleza de fabricación de los artículos de ferritas son cualidades de éstas. Igual que todos los materiales magnéticos las ferritas conservan sus propiedades magnéticas solamente hasta la temperatura de Curie*. En las diferentes ferritas, según su composición, la temperatura de Curie oscila en amplios límites: desde 70 hasta 950 °C. Todas las ferritas poseen una pequeña porosidad (1...10 %).

Para la fabricación de imanes permanentes se utilizan las ferritas magnéticamente duras, entre las que han encontrado un mayor empleo las ferritas de bario $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$. A diferencia de las ferritas magnéticamente blandas las ferritas de bario tienen una estructura cristalina hexagonal, y no cúbica. Dicha estructura determina la dureza magnética de las ferritas de bario, principalmente a cuenta de la fuerza coercitiva. Según su estructura las ferritas de bario son materiales semicristalinos, compuestos de un conjunto de partículas cristalinas. Con esto las partículas cristalinas están orientadas arbitrariamente, lo que determina la igualdad de las propiedades de las ferritas en todas las direcciones. Estas ferritas son isótropas (marca BH (BI)).

Si durante el proceso del prensado de los imanes la masa pulverulenta se somete a una acción de un campo magnético exterior de intensidad grande ($H \approx 800$ A/m), entonces las partículas cristalinas estarán orientadas en una misma dirección. Los imanes de bario, fabricados de este modo, son anisótropos (marca BA (BA)). Estos imanes, en estado acabado, es decir, después de su calcinación en los hornos y magnetización, poseen un nivel más elevado de las características magnéticas (tabla 23). Como se ve de la tabla los imanes fabricados de ferritas de bario poseen una mayor resistencia específica, lo que permite utilizarlos en las zonas de altas frecuencias. Para una mejor utilización a los imanes de bario se les

* Temperatura límite hasta la cual los materiales magnéticos conservan sus propiedades magnéticas.

Table 23. Características fundamentales de las ferritas de bario

Designación de las ferritas	Densidad, g/cm ³	Fuerza coercitiva, A/m	Inducción magnética remanente, T	Resistencia eléctrica específica, $\Omega \cdot m$	Temperatura de Curie, °C
1EIH	4,5	$(128 \dots 144) \cdot 10^3$	0,2...0,22	10^3	450
2BA1	5,0	$(185 \dots 212) \cdot 10^3$	0,3...0,35	10^3	450

da una forma de longitud más pequeña que la sección.

Las ferritas de bario se distinguen por la estabilidad de sus características, pero son sensibles al cambio brusco de la temperatura. Estas ferritas se fabrican de materiales pulverulentos no escasos (óxido de hierro Fe_2O_3 y carbonato de bario) con el método de la tecnología cerámica. Los imanes de ferritas de bario son considerablemente más baratas que los de aleaciones de hierro-níquel-aluminio y otros materiales metálicos.

La fragilidad y la posibilidad de elaborar solamente con rectificado son defectos de todas las ferritas. Estas son semiconductores magnéticos y, por consiguiente, con el aumento de la temperatura disminuye su resistencia específica, hecho que provoca el aumento de las pérdidas por corrientes en torbellino.

Preguntas de control

1. Enumere las características magnéticas por las que se aprecian las propiedades magnéticas de los materiales.
2. ¿En qué grupos fundamentales se dividen los materiales magnéticos y qué particularidades típicas tiene cada grupo?
3. ¿Qué exigencias se presentan a los materiales magnéticamente blandos y magnéticamente duros?
4. ¿Qué representan las permaleaciones y cuáles son sus características magnéticas?
5. ¿Qué son los aceros electrotécnicos y dónde se emplean?
6. ¿Qué representan los aceros electrotécnicos texturizados de estructura de arista y cuáles son sus propiedades típicas?
7. Enumere los materiales metálicos magnéticamente duros y exponga su composición aproximada.
8. ¿Qué representan los materiales metalocerámicos y dónde se emplean?
9. ¿Qué representan las ferritas y en qué grupos fundamentales se dividen?
10. Enumere las características típicas de las ferritas.

Capítulo VII

Superconductores y crioconductores

§ 45. Características fundamentales de los superconductores

De lo expuesto anteriormente se conoce que la resistencia eléctrica de cualquier conductor metálico disminuye con el aumento de la temperatura. En ciertos metales y aleaciones, además de semejante disminución normal de la resistencia eléctrica, durante su enfriamiento se observa una nueva propiedad: a la temperatura desde 10 K (-263°C) y menos, la resistencia eléctrica de algunos de estos metales y aleaciones disminuye bruscamente hasta cero. Este fenómeno se denomina *superconductividad*, y los materiales en los que se observa este fenómeno se denominan *superconductores*. La temperatura a la que se efectúa la transición del material al estado de superconductividad se denomina *temperatura crítica* T_{cr} de la transición a superconducción.

El fenómeno de superconductividad fue descubierto en 1911 por el científico holandés Kamerlingh-Onnes, que investigó la resistencia eléctrica del mercurio a bajas temperaturas. Con esto se estableció que a la temperatura 4,2 K* ($-268,8^{\circ}\text{C}$) la resistencia eléctrica del mercurio disminuyó bruscamente, prácticamente hasta cero, y era imposible medirla. Si tomamos un circuito cerrado (anillo) de metal en estado de superconductividad a la temperatura crítica T_{cr} y se excita en este circuito corriente resultará ser que esta corriente circulará por el circuito durante mucho tiempo. Hasta el presente se han descubierto 27 superconductores en forma de metales puros: aluminio, plomo, telurio, niobio, zinc, molibdeno y otros, y más de mil aleaciones de metales. Los materiales superconductores fundamentales se exponen en la tabla 24.

* 4,2 K es la temperatura de ebullición del helio líquido (temperatura de helio líquido).

Tabla 24. *Propiedades fundamentales de algunos superconductores*

Material	T_{cr} , K	B_{cr} , T
Aluminio	1,19	0,0099
Vanadio	5,3	0,1370
Galio	1,09	0,0051
Iridio	0,14	0,0020
Cadmio	0,56	0,0030
Niobio	9,22	0,1944
Estaño- α	3,72	0,0309
Renio	1,7	0,0198
Titanio	0,4	0,0100
Zinc	0,91	0,0053
Circonio	0,55	0,0047
Aleación 44 % niobio + 56 % titanio	8,7	—
Aleación 50 % niobio + 50 % circonio	9,5	—
Aleación de niobio, aluminio y germanio	20,7	—

Se debe señalar que tales conductores de la corriente eléctrica como la plata, el cobre y el oro no poseen la propiedad de superconductividad. Tampoco poseen la propiedad de superconductividad los materiales ferromagnéticos: el hierro, el níquel, el cobalto y sus aleaciones.

Como se deduce de la tabla el niobio posee la temperatura crítica mayor entre los metales (9,22 K), y la temperatura más baja pertenece al iridio (0,14 K).

En las aleaciones las temperaturas críticas de transición al estado de superconductividad es considerablemente mayor que las de los metales puros. Así, en la aleación compuesta de niobio, aluminio y germanio $T_{cr} = 20,7$ K ($-252,3$ °C).

La temperatura crítica de los superconductores depende de su composición química, estructura cristalina y otros factores.

La segunda propiedad típica de los superconductores es el hecho de que el campo magnético exterior no penetra en estos materiales, que se encuentran en estado de superconductividad*. Por consiguiente, siendo ma-

* Efecto de Meissner.

teriales paramagnéticos ($\mu = 1$), los superconductores se convierten en materiales diamagnéticos, en los que $\mu = 0$ y la inducción magnética en el interior del superconductor también se hace igual a cero ($B = 0$). De tal modo, en el momento de transición del superconductor al estado de superconductividad el campo magnético exterior se expulsa del superconductor (fig. 41). Con

esto, la inducción magnética en el superconductor se hace nula.

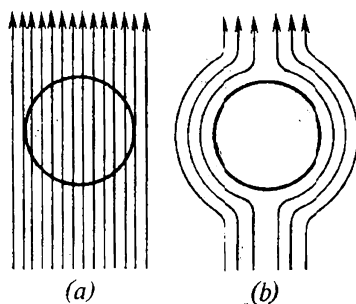


Fig. 41.
Disposición de las líneas de fuerza del campo magnético:
a, al existir un metal paramagnético;
b, al existir un superconductor
 $T < T_{cr}$

Las investigaciones demuestran que durante la acción sobre muchos superconductores incluso de un campo magnético exterior débil desaparece su superconductividad. Semejantes superconductores se denominan *superconductores de primer orden*. A éstos pertenecen todos los metales puros superconductores, excepto el niobio (Nb), el vanadio (V) y el tecnecio (Tc). En la tabla 24 se exponen

los valores críticos de la inducción magnética B_{cr} a la temperatura $T = 0$ K para los metales puros. Al alcanzar estos valores de inducción magnética la superconductividad de estos metales desaparece y éstos se comportan como conductores normales. Ello limita su aplicación.

Conjuntamente con los superconductores de primer orden se descubrieron también *superconductores de segundo orden*. A éstos pertenecen todas las aleaciones superconductoras y ciertos metales puros: el niobio (Nb), el vanadio (V) y el tecnecio (Tc). Los superconductores de segundo orden se diferencian de los de primer orden por tener mayores valores de la temperatura crítica T_{cr} y mayores valores críticos de la inducción magnética B_{cr} . Además, la corriente crítica en los superconductores de segundo orden puede ser aumentada introduciendo en estos superconductores impurezas, que provocan la va-

riación de la estructura de los superconductores de segundo orden. Es un defecto de los superconductores de segundo orden el hecho de que éstos pierden la propiedad de superconductividad en un determinado intervalo de intensidades del campo magnético (H_{cr1} , H_{cr2}) que actúa sobre el superconductor.

Este defecto está eliminado en los superconductores de tercer orden, que se diferencian de los superconductores de segundo orden por su composición y heterogeneidad de la estructura. Esto permite alcanzar en ellos valores críticos muy grandes de la corriente (densidad de corriente mayor de 10^5 A/cm²) en los campos magnéticos fuertes con inducción (B) desde 10 hasta 50 T.

Estas propiedades de los superconductores de tercer orden abren posibilidades de su empleo práctico en la electrotécnica. A los superconductores de tercer orden pertenecen las combinaciones de niobio con estaño (NbSn₃) de niobio con titanio (NbTi), de niobio con circonio y titanio (NbZrTi) y otros.

§ 46. Aplicación de los superconductores

Una de las aplicaciones principales de los superconductores es la creación sobre su base de potentes solenoides superconductores, que permiten obtener campos magnéticos con inducción ≈ 20 T. Los gastos de energía para enfriar el solenoide hasta la temperatura 4,2 K resultan ser 1000 veces menores en comparación con la energía necesaria para la alimentación con corriente a un imán normal de una misma potencia.

La utilización de arrollamientos superconductores en las máquinas eléctricas y en los transformadores permite fabricar éstos sin núcleos y circuitos magnéticos de acero, ya que la inducción de los campos magnéticos creados por los arrollamientos superconductores supera considerablemente la inducción creada por los núcleos de materiales ferromagnéticos. Junto a esto, al existir arrollamientos superconductores, se eliminan totalmente las pérdidas térmicas. Las ventajas enumeradas de los arrollamientos superconductores permiten disminuir notablemente las dimensiones y la masa de las máquinas eléctricas

y de los transformadores. El fenómeno de repulsión de dos superconductores (como resultado de la repulsión mutua de sus campos magnéticos), que antes señalamos, permite crear apoyos sin rozamiento y, por consiguiente, sin pérdidas en las máquinas eléctricas y otros mecanismos.

Se han elaborado las primeras estructuras de cables superconductores, que permiten en alto grado aumentar las potencias transmitidas sin pérdidas de energía. Particularmente, se han realizado grandes trabajos para elaborar hilos de bobinado superconductores. Estos últimos se fabrican de aleaciones tipo disoluciones sólidas a base del niobio y del circonio (NbZr), a base del niobio y del titanio (NbTi) o se utiliza una aleación de tres componentes: niobio—titanio—circonio (NbTiZr), que es más tecnológica. Estas aleaciones superconductoras permiten obtener hilos de 0,2 a 0,4 mm y más.

Los materiales superconductores enumerados permiten obtener hilos de fácil deformación. Conjuntamente con las aleaciones enumeradas, que son disoluciones sólidas de metales, encuentran también aplicación las aleaciones que son combinaciones intermetálicas. Éstas se distinguen por el alto nivel de sus características, es decir, mayor temperatura crítica (18,2...20,2 K), mayor inducción crítica del campo magnético (24,5 Tl a 4,2 K) y mayor densidad admisible de corriente (hasta $2 \cdot 10^6$ A/cm²). Entre dichas aleaciones encuentran aplicación el estannuro de niobio (NbSn_3) y el germaniuro de vanadio (V_3Ge).

La fragilidad y dificultad de obtener hilos con estas combinaciones intermetálicas son defectos de las últimas. Los arrollamientos fabricados con estos hilos no admiten deformaciones ulteriores.

Los hilos de bobinado de aleaciones superconductoras se confeccionan con aislamiento de esmalte—barniz a base de las poliamidas, con aislamiento en forma de una capa monolítica de plástico fluorocarbúrico, y asimismo con aislamiento de hilos y películas de lavsán y otros polímeros.

§ 47. Propiedades fundamentales de los criosuperconductores y su aplicación

Los criosuperconductores, o hiperconductores, son metales que poseen valores muy pequeños de la resistencia eléctrica a temperaturas bajas, pero superiores a las temperaturas críticas de los superconductores. Tales son las temperaturas del hidrógeno líquido (20,4 K), del neón líquido (27,3 K) y del nitrógeno líquido (77,4 K), a las cuales la resistencia eléctrica de estos materiales disminuye bruscamente. Ello se explica por la brusca disminución de la intensidad de las oscilaciones de la red cristalina, lo que reduce la dispersión de los electrones, que componen la corriente en los conductores metálicos.

El grado de dispersión de los electrones en este caso quedará determinado solamente por las partículas de las impurezas que contiene el crioconductor metálico. Por esto, en calidad de criosuperconductores se emplean metales conductores de elevada pureza química. A éstos pertenecen el cobre ($\text{Cu} \geq 99,99\%$), el aluminio ($\text{Al} \leq 99,999\%$), la plata ($\text{Ag} \leq 99,99\%$) y el berilio ($\text{Be} \leq 99,95\%$), todos particularmente puros. Estos criosuperconductores se emplean en estado recocido (blando), lo que eleva su conductividad. Los arrollamientos de las máquinas eléctricas, transformadores y aparatos eléctricos, fabricados de criosuperconductores y que funcionan a temperaturas criogénicas, admiten grandes densidades de corriente y poseen pérdidas considerablemente menores. Esto hace posible disminuir notablemente las dimensiones y la masa de las máquinas y aparatos eléctricos (de confección criogénica) y elevar considerablemente su rendimiento.

Preguntas de control

1. Enumere las propiedades fundamentales de los superconductores.
2. ¿Qué se comprende bajo el concepto temperatura crítica de la transición superconductora?
3. ¿En qué grupos se dividen los materiales superconductores?
4. ¿Qué representan en sí los criosuperconductores?

Capítulo VIII

Soldaduras, fundentes y colas

§ 48. Soldaduras y fundentes

Las soldaduras son metales puros o aleaciones que se emplean en calidad de sustancia adhesiva durante la unión de partes metálicas. Cualquiera soldadura debe elegirse de tal manera que ésta tenga una temperatura de fusión considerablemente inferior que la de las partes metálicas que une. Las soldaduras se dividen en blandas y fuertes.

Las soldaduras de fácil fusión, o soldaduras blandas, tienen una temperatura de fusión menor que 500 °C, y las de difícil fusión, o soldaduras fuertes, tienen una temperatura de fusión mayor que 500 °C.

En las marcas de las soldaduras las letras y cifras significan lo siguiente: la letra П (P), situada en primer término, significa soldadura; las letras situadas tras ella significan lo siguiente: O (O), estaño; Cy (Su), antimonio; C (S), plomo; A (A), aluminio; Cp (Sr), plata; M (M), cobre; Kp (Kr), silicio; Bu (Vi), bismuto; Зл (Zl), oro; K (K), cadmio. Las cifras dispuestas después de las letras señalan el porcentaje de contenido del material básico en la soldadura. Por ejemplo, ПОС-90 es una soldadura de estaño-plomo con un contenido de estaño de 90 % (en masa); ПОСК-50-18 contiene 50 % de estaño, 18 % de cadmio, y lo restante es plomo (en masa).

Más ampliamente se utilizan las soldaduras de estaño-plomo. Estas poseen buena fluidez y penetran bien en las costuras más finas, se adhieren bien a la mayoría de los metales, al cobre, latón, aceros, zinc, y garantizan una resistencia suficientemente grande de las costuras soldadas. Las soldaduras con un contenido de estaño menor que 15 % se utilizan para soldar piezas cuando no se requiere una resistencia mecánica grande. Las soldaduras de estaño-plomo con contenido grande de bismuto (50...57 %)

poseen una temperatura de fusión mínima (79...95 °C), pero las costuras soldadas con ella son frágiles.

En la tabla 25 se exponen las características fundamentales de las soldaduras blandas.

Tabla 25. Soldaduras blandas

Marca de la soldadura	Composición de la soldadura, % de la masa	Temperatura de fusión, °C	Esfuerzo destructor durante la tracción, N/m ²	Esfera de aplicación
— ПОС-90	Estaño puro Estaño 89-91 Plomo 11-9	232 220	5 · 10 ⁷ 4,9 · 10 ⁷	Soldadura y estañadura del cobre, latón y bronce con la formación de costuras y recubrimientos resistentes a la corrosión
ПОС-61	Estaño 60-61 Plomo 40-39	190	4,3 · 10 ⁷	Ídem, pero a una temperatura más baja
ПОС-40	Estaño 39-41 Plomo 61-59	238	3,8 · 10 ⁷	Ídem, pero a una temperatura elevada
ПОС-10	Estaño 9-10 Plomo 91-90	299	3,2 · 10 ⁷	Ídem, pero para la soldadura de partes con destino de poca responsabilidad
ПОССу40-2	Estaño 39-41 Antimonio 2 Plomo (lo restante)	229	4,3 · 10 ⁷	Soldadura y estañadura de hilos de cobre y partes de latón y bronce con la formación de costuras herméticas
П300	Zinc 60 Cadmio 40	300	3,5 · 10 ⁷	Soldadura de hilos y piezas de aluminio y de aleaciones de aluminio

A las **soldaduras fuertes** pertenecen las de cobre-zinc (ПМЦ-54, ПМЦ-48 y otras) y de cobre-plata (ПЦр-72, ПЦр-70, ПЦр-50 y otras), y asimismo las aleaciones de aluminio con cobre, zinc y silicio. Más ampliamente se utilizan las soldaduras de cobre-plata. Estas se distinguen por tener pequeña resistencia específica eléctrica y,

por esto, se emplean ampliamente para la unión de las partes conductoras de corriente de metales ferrosos y no ferrosos, que se humectan bien con estas soldaduras. Con esto se forman costuras soldadas mecánicamente estables y resistentes a la corrosión.

La soldadura a base de aluminio con adiciones de cobre, silicio y estaño se distinguen por su estabilidad mecánica y resistencia a la corrosión atmosférica. Estas soldaduras se utilizan para unir los hilos de aluminio y de sus aleaciones.

Las soldaduras de cobre-zinc poseen fragilidad y no son resistentes a las vibraciones y a las cargas de impacto, pero la resistencia eléctrica de las costuras es muy pequeña. Estas soldaduras se emplean para juntar las piezas de cobre, latón, bronce y aceros.

En la tabla 26 se exponen las características fundamentales de las soldaduras fuertes.

Tabla 26. Soldaduras fuertes

Marca de soldadura	Composición de la soldadura, % de la masa	Temperatura de fusión, °C	Esfuerzo destructor durante la tracción, N/m ²	Esfera de aplicación
HCp-72	Plata 72 Cobre 28	779	$36 \cdot 10^7$	Soldadura de piezas conductoras de corriente de cobre, latón, bronce y otros metales, excepto el aluminio
HCp-70	Plata 70 Cobre 26 Zinc 4	775	$35 \cdot 10^7$	Ídem, pero con resistencia grande a la corrosión
HMI-54	Cobre 54 Zinc 46	880	$26 \cdot 10^7$	Soldadura de piezas de cobre, latón, bronce y acero con la formación de costuras frágiles
34-A	Aluminio 66 Cobre 28 Silicio 6	525	$18 \cdot 10^7$	Soldadura de piezas de aluminio y aleaciones de éste con la formación de costuras de elevada resistencia mecánica

Para soldar, además de la soldadura, se necesitan sustancias fundentes, o simplemente fundentes. Su destino consiste en limpiar la superficie de los metales a soldar de óxidos y otros ensuciamientos y en proteger a las superficies de los metales que se unen contra la oxidación en el proceso de la soldadura.

Los fundentes pueden ser sustancias sólidas pulverulentas (bórax, ácido bórico, colofonia y otros) o líquidas (disolución acuosa de cloruro de zinc, disolución alcohólica de colofonia y otras). A veces se emplean fundentes semi-líquidos: pastas.

Al soldar cobre, latón y bronce con soldaduras blandas a base plúmbica se emplean fundentes que no provocan la corrosión de las costuras soldadas. A estos fundentes pertenecen la colofonia, la disolución de colofonia en alcohol etílico y otras composiciones a base de la colofonia. La colofonia es un fundente de baja actividad, por lo que la superficie de los metales que se sueldan deben protegerse minuciosamente antes de aplicar el fundente de colofonia.

Al soldar con soldaduras duras (de alta temperatura de fusión), que se funden a una temperatura mayor que 500°C , la colofonia y otros fundentes que se desintegran fácilmente a una temperatura grande no pueden ser utilizados. Durante la soldadura a alta temperatura del acero, cobre y aleaciones de cobre (latón, bronce y otros) en calidad de fundentes se emplean más frecuentemente el bórax $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ o la mezcla de éste con ácido bórico H_3BO_3 y otras sales. Para la soldadura del aluminio, que se oxida fácilmente en el aire, se emplean fundentes particularmente activos, que pueden disolver la película densa de óxidos de aluminio. A tales fundentes pertenece la composición de cloruro de litio, de fluoruro sódico, cloruro de zinc y cloruro de potasio. En todos los casos de elección del fundente se debe tener en cuenta lo siguiente: la temperatura de fusión del fundente sólido debe ser menor que la temperatura de fusión de la soldadura, y la temperatura a la que se suelda debe ser inferior a la de la descomposición térmica del fundente. Para evitar la corrosión de las costuras soldadas con soldaduras fuertes los restos de fundente se deben elimi-

Tabla 27. Fundentes para la soldadura blanda

Marca o nombre del fundente	Composición, % en masa	Característica general y esfera de aplicación
Colofonia clara	Ésteres de ácidos de resinas	Para la soldadura de partes conductoras de cobre, latón y bronce
K3	Colofonia 25-30	Ídem
BTC	Alcohol etílico 75-70 Vaselina 66 Trietanolamina 6,5 Ácido salicílico 6,3 Ácido etílico 21,2	Para la soldadura de artículos conductores de cobre, latón, aluminio, bronce, constantán, manganina, plata, platino y sus aleaciones
ΦA	Anilina muriática 1,8 Glicerina 1,5 Colofonia 96,7	Ídem, fundente más activo, que limpia bien la superficie de los metales que se unen
ΦII	Colofonia 16 Cloruro de zinc 4 Vaselina 80	Para soldar artículos de metales ferrosos y no ferrosos con la formación de costuras de elevada resistencia (pero se requiere un lavado ulterior con agua)

Tabla 28. Fundentes para la soldadura fuerte

Composición, % en masa	Característica general y esfera de aplicación
Bórax calcinado	Para la soldadura de artículos de cobre, bronce, platino, níquel y aceros (con soldaduras de cobre y de cobre-zinc). Los restos del fundente deben eliminarse para evitar la corrosión
Bórax fundido 21 Ácido bórico 70 Fluoruro de calcio 9	Para soldar artículos de cobre, latón, bronce, acero inoxidable y al carbono (con soldadura de cobre)
Anhídrido bórico 36 Fluoruro de potasio 42 Fluoborato de potasio 22	Ídem, pero para soldar con soldaduras de plata
Fluoruro de sodio 10 Cloruro de zinc 8 Cloruro de litio 32 Cloruro de potasio 50	Para soldar piezas de aluminio y de sus aleaciones (con soldaduras de aluminio). Los restos de fundente deben eliminarse para evitar la corrosión

nar lavando las costuras con agua caliente con ayuda de un cepillo.

La composición y las propiedades fundamentales de ciertos fundentes se exponen en las tablas 27 y 28.

§ 49. Colas y composiciones aglutinantes

Las colas y las composiciones aglutinantes se emplean ampliamente en la fabricación de aparatos eléctricos, instrumentos y otros tipos de equipos eléctricos. De las colas y composiciones aglutinantes no siempre se exigen buenas propiedades electroaislantes. Estos materiales, en primer lugar, deben poseer la propiedad de pegar: adhesión a los materiales metálicos y no metálicos.

La pegadura de cualesquiera dos materiales sucede como resultado de la adherencia de la película de cola con las superficies de los materiales que se pegan. Como resultado de las reacciones químicas que tienen lugar en la película de cola, esta última se convierte en sustancia sólida, que une sólidamente las partes que se pegan. La adhesión de la película de cola con la superficie de los materiales que se pegan no surge solamente como resultado de las reacciones químicas, sino que también como consecuencia de la aparición de fuerzas intermoleculares y electrostáticos entre la película de cola y las superficies de los materiales que se pegan.

Sobre la resistencia de la costura de cola ejercen influencia el espesor y la continuidad de la película de cola, la contracción volumétrica de dicha película después de la pegadura, la composición y estructura de los materiales que se pegan, y asimismo el grado de preparación de las superficies a pegar. La cola debe rellenar totalmente la holgura entre las partes a pegar sin inclusiones de aire. El espesor de la película de cola no debe ser muy grande, pero debe garantizar la continuidad de la capa de cola en toda la superficie de pegadura. Para garantizar una película continua de goma de espesor óptimo y la penetración de la cola en los poros de las superficies a pegar éstas se deben ajustar previamente entre sí y limpiar minuciosamente de las suciedades con ayuda de disolventes. Para una mejor pegadura muchos materia-

les (metales, plásticos) se someten a un tratamiento de chorreado con arena o al lijado, para obtener cierta escabrosidad de las superficies a pegar. Ello asegura el aumento de la resistencia de la costura de cola. Con este mismo fin las piezas a pegar se deben someter a una compresión a presiones determinadas. Muchas colas exigen para su endurecimiento un calentamiento hasta la temperatura de 90 a 180 °C y más.

Las colas forman un grupo grande de sustancias. En la producción electrotécnica se emplean colas a base de resinas sintéticas, que poseen la mayor capacidad de pegadura. Muchas de estas colas poseen buenas propiedades electroaislantes. A semejantes colas pertenecen los barnices gliptálicos para pegar, que se emplean ampliamente para la pegadura de hojitas en la producción de aislamiento lamelar de mica. A dichas colas pertenecen los barnices de baquelita, que se utilizan mucho en la fabricación de plásticos lamelados electroaislantes (cartón baquelizado, textolita y otros).

Las colas БФ (BF) que son disoluciones alcohólicas de resinas butiladas-fenólicas, han obtenido una gran difusión. Estas colas se fabrican de tres marcas: БФ-2, БФ-4 y БФ-6. Se distinguen por su composición y tienen sus particularidades, que determinan la esfera de su aplicación. Así, las colas БФ-2 y БФ-4 se utilizan para la pegadura de metales, plásticos, cristales, cerámica, mica y madera. La cola БФ-4 garantiza una elevada resistencia de la costura de cola a las vibraciones. La cola БФ-6 forma una costura elástica de cola y por eso se destina para la pegadura de gomas y tejidos y para la fijación de éstas a los metales y a los plásticos.

Las colas БФ se aplican en dos o tres capas a cada superficie a pegar. El tiempo de secado de cada capa a la temperatura ambiente es de 1 h, después de lo cual se aplica la capa siguiente de cola, que también se seca durante 1 h. A continuación las piezas a pegar se unen entre sí y se frotan ligeramente. Luego se colocan debajo de la prensa o en una mordaza de rosca, para garantizar una presión de $(4...12) \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$.

La solidificación de la cola transcurre a la temperatura de 140 a 150 °C (БФ-2 y БФ-4) y de 90 a 100 °C

(БФ-6) en el transcurso de 0,5 a 3 h. El aumento del tiempo de calentamiento eleva la resistencia de la costura de cola. Para mantener la costura de cola a temperaturas elevadas las piezas que se pegan se colocan en un termostato o se utiliza una prensa con placas que se calientan. Las chorreaduras de cola que se forman durante el prensado de las piezas que se unen se limpian con la espátula (paleta metálica) o con un trapo.

Las costuras de cola, formadas por las colas БФ, son resistentes al agua, a los aceites minerales, al keroseno, a la gasolina y a muchos alcoholes. Éstas no provocan la corrosión de los metales y pueden trabajar en el intervalo de temperaturas desde -60 hasta $+80$ °C.

Han obtenido una amplia utilización las colas a base de resinas epoxídicas líquidas y sólidas. Como es conocido, las resinas epoxídicas se distinguen por su fuerte adhesión a los metales, plásticos, cristales, cerámica y a otros materiales. Además, las resinas epoxídicas y las colas se distinguen por tener una contracción volumétrica pequeña durante su solidificación, lo que aumenta la resistencia de la costura de cola. Las colas epoxídicas pueden solidificarse a la temperatura de 20 °C y a temperaturas elevadas de 120 a 170 °C (colas de solidificación en caliente). Las resinas epoxídicas líquidas se deben someter a un tratamiento al vacío a $50...70$ °C, con el fin de separar de ellas las inclusiones de aire, y después se pueden mezclar con los endurecedores.

Entre las colas epoxídicas se emplean ampliamente las colas a base de las resinas ЭД (ED)-15, ЭД-16 y ЭД-20, que son masas pastosas en las que se introduce $15...20$ % de endurecedor de polietileno-poliaminas*. Los componentes iniciales se mezclan minuciosamente. La cola preparada sirve para ser empleada en el transcurso de 2 a 6 h, después de las cuales comienza a espesarse considerablemente y paulatinamente se transforma en sustancia sólida. Por esto, el endurecedor (polietileno-poliamina) se debe agregar a la resina directamente antes de aplicar la cola. En las superficies previamente prepara-

* El polietileno-poliamina es un líquido que se mezcla bien con la resina epoxídica líquida.

das y limpias se aplica una capa de cola, que se deja secar al aire durante 15...30 minutos. Después las superficies a pegar se unen una a otra y se aprietan a una presión de $(1...2) \cdot 10^5$ N/m². La solidificación de la costura de cola se realiza a 20 °C durante 18 h. Para asegurar una costura de cola más resistente se requiere además un tratamiento complementario de dicha costura a 100 °C durante 4 h.

Si en la resina epoxídica se introduce otro endurecedor, anhídrido maleico, entonces se obtiene cola de solidificación en caliente. En este caso la costura de cola se solidifica a 120 °C durante 16...24 h.

Más frecuentemente se emplea el régimen escalonado de solidificación de la costura de cola: 6...8 h a 120 °C, después durante 4...6 h a 150 °C. En ambos casos de solidificación las superficies a juntar deben encontrarse a una presión de $(0.5...3) \cdot 10^5$ N/m².

Con el fin de elevar la resistencia al calor y rebajar las tensiones residuales en las costuras en la cola se introducen cargas: cuarzo pulverulento, cemento y polvos metálicos (plata, cobre y otros)*. Estos últimos permiten obtener costuras de cola de conductividad grande. Ello es necesario para pegar las piezas metálicas conductoras de corriente en los aparatos e instrumentos eléctricos.

La característica fundamental de las colas (antes de su aplicación) es la viscosidad, que debe llevarse hasta los valores prescritos por la instrucción tecnológica para la cola dada. Para esto la mezcla de cola se debe calentar, y su viscosidad debe controlarse con ayuda de viscosímetros.

Las colas epoxídicas pueden ser también polvos o barras**. La cola pulverulenta se aplica en capa fina a las superficies previamente calentadas (100...120 °C) de las piezas metálicas o de plástico a pegar. Al utilizar la cola en forma de barra con ésta se frotan las superficies calentadas de las piezas a pegar. En lo demás la tecnología de pegadura no se diferencia de la descrita antes para las colas epoxídicas líquidas. La solidificación de

* La cola con polvos metálicos introducidos en ella se denomina contactadora.

** Cola pulverulenta («Epoxid II (P)»); cola en forma de barras («Epoxid IIP (PR)» y otros).

las costuras de cola sucede a presiones de $(0,5...0,3) \times (0,5...0,3) \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ y temperaturas de 120 a 200 °C en el transcurso desde 0,5 hasta 10 h. Las costuras de colas epoxídicas pueden trabajar en el intervalo de temperaturas desde -60 hasta $+80$ °C*. Se debe señalar que las costuras solidificadas de colas epoxídicas y colas БФ poseen buenas características eléctricas $\rho_v = 10^{11}...10^{12} \Omega \cdot \text{m}$, $E_r = 10...15 \text{ MV/m}$.

Las costuras solidificadas de colas epoxídicas son resistentes a la humedad, gasolina y aceites lubricantes. Al emplear colas epoxídicas se debe tener en cuenta su toxicidad, lo que requiere una observación de la técnica de seguridad.

En la producción electrotécnica, además de las colas, se utilizan ampliamente composiciones conglomerantes (vehículos). Estas composiciones representan masas fluidas pastosas que endurecen con el tiempo. A diferencia de las colas estas composiciones se utilizan para estriar (fijar) la armadura metálica en los aisladores, por ejemplo, las bridas en los aisladores pasamuros o de soporte, para la pegadura de los cabezales de fundición en los aisladores colgantes, y asimismo para la fijación de las barras metálicas en los aisladores colgantes y de espiga.

Para el armado de los aisladores encuentran un mayor empleo las composiciones conglomerantes de cemento-arena. Éstas se componen de 2 a 3 partes de cemento portland de elevada calidad (marca 500 ó 600) y de una parte de arena cuarzosa lavada. El cemento portland es clínker de cemento finamente molido, obtenido como resultado de la calcinación de la mezcla de los materiales básicos, que contienen cal y arcilla, o de las margas naturales cementeras (calizas arcillosas naturales).

En la composición del cemento se introducen también adiciones hidráulicas (hasta 15 %) en forma de escoria de alto horno granulada y otras sustancias minerales, que contribuyen al aumento de la resistencia mecánica del cemento endurecido (piedra de cemento). A la par de las adiciones hidráulicas al cemento se añaden rocas inertes.

* Algunas colas epoxídicas solidificadas pueden trabajar en el intervalo de temperaturas desde -120 hasta $+100$ °C (BK (VK)-1 y otras).

La densidad del cemento portland es de 3000 a 3200 kg/m³. Este tiene grandes ventajas en comparación con otros cementos: la capacidad de adherirse al acero y a la fundición sin ocasionarlos perjuicio alguno. La calidad del cemento portland se determina por su composición química, régimen de calcinación de los materiales básicos y finura de molienda de las componentes básicas.

Las características más importantes del cemento son la velocidad de fraguado y la velocidad de endurecimiento.

El fraguado del cemento es la transformación de la pasta de cemento en una masa sólida no plástica. El endurecimiento del cemento es el proceso de acrecentamiento de su resistencia mecánica con el tiempo. El endurecimiento del cemento puede suceder tanto en el aire como en el agua.

Los cementos portland se caracterizan por sus relativamente pequeñas velocidades de fraguado y de endurecimiento: el comienzo del fraguado no es antes de 45 minutos, y el final no antes de 12 horas desde el comienzo de endurecimiento del cemento. El endurecimiento intenso, acompañado del incremento de la resistencia mecánica, sucede, fundamentalmente, en el transcurso del primer mes.

Las velocidades de fraguado y endurecimiento del cemento dependen de la temperatura y humedad del cemento, temperatura del agua que se utiliza para la disolución del cemento, y asimismo de la temperatura y humedad del aire circundante. También tienen gran importancia las composiciones química y granulométrica del cemento portland. Cuando el cemento está húmedo empeoran las propiedades de fraguado y endurecimiento, por lo que el cemento portland se puede conservar en locales secos no más de tres meses. No se permite la mezcla de cementos de distintos lotes. La reducción de la temperatura de la pasta de cemento también disminuye las propiedades de fraguado y endurecimiento del cemento.

En dependencia de la resistencia mecánica de las muestras* a la tracción (después de su endurecimiento

* Las muestras son barritas con dimensión de 40 × 40 × 160 mm. Para su fabricación se toma cemento y arena de cuarzo en la correlación 1 : 3 (según la masa).

en el agua durante 28 días) se distingue el cemento portland de cuatro marcas (tabla 29).

El segundo componente de las composiciones conglomerantes es la arena cuarzosa, que es una carga inerte en las composiciones de cemento-arena. La arena debe liberarse de las impurezas arcillosas. Para ello la arena se

Tabla 29. *Características mecánicas de los cementos*
(después del endurecimiento en el agua durante 28 días)

Marca del cemento	Esfuerzo destructor durante la compresión, N/m ² , no menos de	Esfuerzo destructor durante la flexión, N/m ² , no menos de
300	$300 \cdot 10^5$	$45 \cdot 10^5$
400	$400 \cdot 10^5$	$55 \cdot 10^5$
500	$500 \cdot 10^5$	$60 \cdot 10^5$
600	$600 \cdot 10^5$	$65 \cdot 10^5$

lava con agua en dispositivos especiales, y después se seca. Además, la arena debe tener una composición granulométrica determinada, la masa principal de la cual (96 %) son partículas con dimensión de 0,15 a 0,2 mm.

Las mezclas de cemento-arena que se utilizan se componen de 75 a 80 % de cemento portland y, respectivamente, de 25 a 20 % de arena de cuarzo. El cemento y la arena se zarandean (por separado) a través de un tamiz vibratorio, y después se mezclan minuciosamente en mezcladoras especiales.

Para la disolución con agua de la mezcla de cemento-arena se toma agua del caño en la correlación 16...18 fracciones de masa por cada 100 fracciones de masa de la mezcla seca. Semejante correlación de las componentes secas de la mezcla y del agua garantiza la fluidez necesaria a la disolución de cemento-arena, por ejemplo, durante el armado de los aisladores, y asimismo suficiente resistencia mecánica de la composición de cemento-arena endurecida.

Los cementos portland pertenecen a los cementos hidráulicos, es decir, a las sustancias que endurecen a velocidad máxima en un ambiente húmedo.

Durante el endurecimiento del cemento portland en

el agua su contracción volumétrica es muy insignificante, pues se crean buenas condiciones para el transcurso de los procesos químicos bajo la acción del agua (hidrólisis e hidratación) entre las sustancias que entran en la composición del cemento. Como resultado tiene lugar el hinchamiento de los granos de cemento y la compactación continua de la piedra de cemento originada, cuyo resultado es el aumento de la resistencia mecánica de ésta. No obstante, el endurecimiento del cemento en el agua es un proceso largo. Para lograr un endurecimiento rápido de los estribos se emplea el vaporizado de las costuras de cemento-arena en las piezas que éstas unen, por ejemplo, en los aisladores armados*. Para ello los aisladores se colocan en estantes perforados de las cámaras de vaporización, donde penetra constantemente el vapor con temperatura de 70 a 80 °C.

Las composiciones de cemento-arena deben poseer un cambio uniforme del volumen. En caso de emplear cemento, que con el transcurso del tiempo cambia irregularmente de volumen, particularmente al absorber la humedad del aire, puede destruirse tanto la capa de cemento como la armadura del aislador. Por esto, es obligatorio el ensayo del cemento a la uniformidad de cambio de volumen.

El desprendimiento con el tiempo de la cal libre del cemento portland, que se disuelve en el agua, es un defecto de éste. Ello puede conducir al quebrantamiento de la ligadura del estribo de cemento con el material electrocerámico y con la armadura, es decir, a la destrucción del aislador. Para la protección de los estribos endurecidos de cemento contra la lixiviación por el agua (de la cal libre) las costuras de cemento se recubren con barnices y esmaltes resistentes al agua. Esto es también necesario para evitar la penetración de la humedad al interior de los estribos de cemento y la humectación de las juntas de caña de lona o de composición de corcho, lo que conduce a la reducción de la resistencia eléctrica de los aisladores.

* Aisladores con las piezas metálicas (armadura) sujetas a ellos con composición de cemento-arena o de otro tipo.

Preguntas de control

1. ¿Qué son las soldaduras y para qué se destinan?
2. ¿Cuál es el destino de los fundentes?
3. ¿Qué propiedades típicas poseen las colas?
4. ¿Qué representan las composiciones conglomerantes y para qué se emplean?

Literatura

- Богородицкий Н. П., Пасынков В. В., Тареев Б. М.* Электротехнические материалы. — М.: Энергия, 1977.
- Bogoroditski N. P., Pasinkov V. V., Tareev B. M.* Materiales electrotécnicos (en ruso).
- Васильев Н. П.* Лабораторные работы по электроматериаловедению. — М.: Высшая школа, 1982.
- Vasiliev N. P.* Trabajos de laboratorio en la ciencia de los materiales eléctricos (en ruso).
- Корицкий Ю. В.* Электротехнические материалы. — М.: Энергия, 1976.
- Koritski Yu. V.* Materiales electrotécnicos (en ruso).
- Никулин Н. В.* Справочник молодого электрика по электротехническим материалам и изделиям. — М.: Высшая школа, 1982.
- Nikulin N. V.* Prontuario del joven eléctrico respecto a materiales y artículos electrotécnicos (en ruso).
- Преображенский А. А.* Теория магнетизма, магнитные материалы и элементы. — М.: Энергия, 1976.
- Preobrazhenski A. A.* Teoría del magnetismo, materiales y elementos magnéticos (en ruso).
- Савалов Г. Г., Белый Д. И.* Сверхпроводящие и криорезистивные обмоточные провода. — М.: Энергия, 1976.
- Svalov G. G., Belii D. I.* Hilos superconductores y crioresistentes para devanados (en ruso).
- Темкин И. В.* Производство электроугольных изделий. — М.: Высшая школа, 1970.
- Tiomkin I. V.* Producción de artículos de carbón eléctrico (en ruso).
- Электрорадиоматериалы*/Под ред. Б. М. Тареева. — М.: Высшая школа, 1978.
- Materiales eléctricos para la radio.* Bajo la redacción de B. M. Tareev (en ruso).

Anexo 1

Características fundamentales de los materiales electroaislantes de aglomerados de desperdicios de mica

Material(*)	Marca	Espesor, mm	Características eléctricas a 20 °C		Esfera de aplicación
			rigidez eléctrica (no menos), MV/m	resistividad de volumen, $\Omega \cdot m$	
Aglomerado de desperdicios de mica para colectores	KCIII	0,45; 0,50; 0,55; 0,60; 0,70; 0,75; 0,80; 0,85; 0,90; 0,95; 1,0; 1,05; 1,10; 1,20	32...34 29...29	$4 \cdot 10^{10}$... $4 \cdot 10^{11}$ $4 \cdot 10^{10}$... $4 \cdot 10^{11}$	Juntas electroaislantes entre las láminas en los colectores de las máquinas eléctricas. La resistencia al calor es de 130 °C
		0,10; 0,12; 0,15	33...38 28...33	$4 \cdot 10^{11}$ $4 \cdot 10^{11}$	Aislamiento de ranura y juntas aislantes en las máquinas y aparatos eléctricos. La resistencia al calor es de 200...300 °C
Aglomerado flexible de desperdicios de mica	ГCII; ГCII-ПJI-40 ГCII-ПJI-20 ГCII-ПJI-50 ГCII; ГCII ГCIIK; ГCIIK	0,15; 0,20; 0,25	1,6...4,2** 5,0** 6...7**	$4 \cdot 10^{10}$	Idem, pero la resistencia al calor es de 130 °C
		0,25; 0,3 0,40...0,3 0,40; 0,45; 0,25; 0,30	Idem	$4 \cdot 10^{11}$	Idem, pero la resistencia al calor es de 155 °C

Aglomerado de mica-folio	Г ₁ CKM	0,40; 0,42; 0,45	4,3...4,5**)	40 ¹²	Ídem, pero la resistencia al calor es de hasta 300 °C
	Г ₁ CKII	0,20; 0,25; 0,30	4,2...6,3		
	CBII-T	0,40; 0,42; 0,45	4,5...2,5**)	40 ¹¹	
	JIC25-TT; JIC25-TT-YII-2,5 JIC25-CT JIC25-CT-YII-2,5 JIC25-TBJI JIC25-TBJI-Y-2,5 JIC25-TBM JIC25-TM-YII-2,5 JIC25-TII; JIC25-TII-YII-2,5 JIC40-TT; JIC40-TT-YII-2,5 JIC40-CT-YII-2,5 JIC40-TBM JIC40-TBM-YII-2,5 JIC40-TII; JIC40-TBM-YII-2,5 JIC40-TII JIC40-T-YII-2,5 JIC40-CII JIC40-CII-YII-2,5	0,41 0,09 0,41 0,09 0,9 0,43 0,45 0,43 0,44 0,4 0,43	40...44 10...44 15...20 40...44 18...20	40 ¹⁰ 40 ¹¹ 40 ¹⁰ 40 ¹¹	
Cinta no impregnada de aglomerado de des-perdicios de mica					Aislamiento de los polos, barras de los rotores y otros. La resistencia al calor es de 130 °C Aislamiento de las barras de los estatores y rotores en las máquinas eléctricas de alta tensión con resistencia al calor de 130 y 155 °C, según sea el compuesto para impregnación

Continuación

Material*)	Marca	Espesor, mm	Características eléctricas a 20 °C		Estera de aplicación
			rigidez eléctrica (no menos), MV/m	resistividad de volumen, $\Omega \cdot m$	
Cinta no impregnada de aglomerado de des-perdicios de mica	JIC-TT	0,15; 0,17	1,0...1,2**	$10^{10} \dots 10^{11}$	La esfera de aplicación es la misma que la de las cintas no impregnadas, pero en otros tipos de aislamiento en las máquinas eléctricas de alta tensión
	JICK-CC	0,09; 0,40; 0,11; 0,13			
	JIC-ЭП-ТНЛ				
	JIC-ЭП-ТНЛА	0,08; 0,09	3...3,2**	$10^{10} \dots 10^{11}$	
	JICK-110-ТНЛ	0,10; 0,11	1,2...1,4**		
	JICK-5-СПЛ	0,13; 0,15	1,2...1,4		
	JICK-5-ТНЛ				
	JICK-110-CT	0,11; 0,13	1,0...1,2**	10^{12}	
	JICK-110-ТТ				
	JICЭК-5-CT	0,15; 0,17	1,0...1,2**		
	JICЭК-5-ТТ				
	JICK-110-CT	0,20; 0,25	1,0...1,2**	10^{12}	
	JICK-110-ТТ	0,30			
	JICK-110-БНЛ	0,08; 0,10; 0,13; 0,15	1,0...1,2**	10^{11}	
	JICЭП-934-СПЛ	0,11; 0,13	3,0...3,2**	10^{11}	
	JICЭП-934-СПЛА				

* La carga específica de rotura en las cintas no impregnadas de todas las marcas (excepto JIC40-CT y JIC40-TT) se encuentra en los límites de 60 a 120 N/cm, en JIC40-CT y JIC40-TT desde 190 hasta 240 N/cm; en las cintas impregnadas de la mayoría de las marcas es de 4,5 a 72 N/cm, en JICЭП-934-ТНЛА (0,13), JICK-110-БНЛ y JICK-CC es de 100 a 145 N/cm, en JICK-T (0,15...0,17) no es menor que 240 N/cm.

** La tensión disruptiva (kV). Los valores mayores pertenecen a las cintas de mayor espesor.

Características fundamentales de los materiales electroaislantes de plásticos de mica

Material*	Marca	Espesor, mm	Características eléctricas a 20 °C		Esfera de aplicación
			resistividad de volumen, $\Omega \cdot m$	rigidez eléctrica, MV/m	
Plástico de mica para colectores	КИФШ, КИФШС	0,4; 0,5 0,6	$10^{10} \dots 10^{11}$	16...22	Material en chapa, prensado y calibrado en especial. La resistencia al calor es de 130 °C
	КИФШ-1	0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,4; 1,5	$10^{10} \dots 10^{11}$	16...22	
	КИФП	0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5 y más	$10^{10} \dots 10^{11}$	16...22	
Plástico de mica para juntas	ПИФШ	0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9	$10^{11} \dots 10^{12}$	18...20	Material prensado en chapa que se aplica en forma de juntas electroaislantes. La resistencia al calor 130 °C
	ПИФША	1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 5,0			
	ПИФГ	Ídem, pero excluyendo 3,0; 5,0	$10^{11} \dots 10^{12}$	18...20	
Plástico flexible de mica	ГИФГ	0,2; 0,4; 0,3; 0,5	$10^{11} \dots 10^{12}$	18...25	Aislamiento de las barras de rotores, aislamiento de

Plástico de mica foliado	ИФГ-Б ИФГ-БП ИФГ ИФГ-П ГИТ-ТС ГИП-ТС (В) ГИП-СС (В) ГИК-ТС (В)	0,45; 0,20; 0,30; 0,45 0,25; 0,30 0,35; 0,40; 0,45 0,45; 0,55 0,35; 0,43; 0,55 0,46 0,55 0,44 0,43	40 ¹⁰ 40 ¹¹ 40 ¹¹ 40 ¹¹ 40 ¹² 40 ¹¹ 40 ¹¹ 40 ¹¹ 40 ¹⁰	5,5...23 6...25 2,5...7,4** 8,5...11,5** 5...11,5** 8,7...40,7** 10,5...14,5** 22...25** 18...19**	ranura y entre fascs. Resistencia al calor 130 °C. Se utiliza para el aislamiento de las barras de los rotores y otros. La resistencia al calor 130 °C Material flexible electroaislante. La resistencia al calor se determina por la composición de la sustancia aglutinante: para el barniz triclenoglptalico (ГИТ-ТС; ГИТ-Т-ЖСБ y otros) 130 °C; para el polieterepooxidico (ГИП-ТС; ГИП-СС y otros) 155 °C; para el silicónico (ГИС-СС; ГИК-ТС y otros) 180 °C Se emplea en calidad de aislamiento de las espiras y del cuerpo de las máquinas eléctricas. La resistencia al calor es de 130 °C
Plástico de vidrio y mica para composición**					
Cinta de plástico de mica**					

* La carga específica de rotura en las cintas de plástico de mica es de 220 a 250 N/cm. En el plástico de vidrio y mica para composición se encuentra en los límites de 200 a 290 N/cm, y en las muestras enclavadas por ambos lados con tejido de lana de vidrio (ГИП-ЖСБ-ЖСЛ; ГИК-ЖСБ-ЖСЛ (В) y otros) es de 200 a 300 N/cm.

** Las tensiones disruptivas (kV). Los valores mayores pertenecen a las muestras de mayor espesor.

El diseño y la fabricación del equipo moderno para la nueva técnica, dependen de la utilización de materiales modernos. La selección racional de los correspondientes materiales permite construir los tipos modernos de equipo eléctrico con características específicas elevadas y alta fiabilidad de explotación.

Precisamente de estas cuestiones trata el libro que ofrecemos, a nuestro lector. En el mismo, en forma breve y amena, se describen las propiedades fundamentales de los materiales eléctricos que se utilizan en la actualidad: los de aislamiento eléctrico, los de semiconductores y magnéticos. Se analizan, en especial, las propiedades básicas de los superconductores y de los conductores de criógeno.

Este trabajo se destina, en primer lugar, a estudiantes de escuelas técnicas de capacitación profesional. Al mismo tiempo, puede utilizarse para la capacitación profesional de obreros directamente en las condiciones de producción.